

THESE

Présentée par Gilles ROUGERON

pour obtenir le titre de

Docteur

DE L'UNIVERSITÉ JEAN MONNET DE SAINT-ETIENNE ET DE
L'ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Spécialité Informatique, Synthèse d'images

***Problèmes liés
à la couleur
en synthèse d'images***

Soutenue à Saint-Etienne, le 27 janvier 1998

Composition du Jury :

Rapporteurs :	MM	K. Bouatouch JC. Paul
Examineurs :	Mmes	C. Brusque F. Viénot
	MM	A. Trémeau B. Péroche

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Bernard Péroche. Malgré les (très) nombreuses fonctions dont il est chargé, il a toujours pu trouver du temps à me consacrer, ce qui n'est pas un mince exploit. Je dois aussi saluer ici sa grande expérience et ses compétences scientifiques. Il a ainsi pu, avec sagacité, en plusieurs moments clés, réorienter mes recherches. Enfin, je dois signaler que sans son aide précieuse, et ses conseils avisés, les diverses publications liées aux travaux présentés dans ce mémoire n'auraient jamais pu advenir. Pour tout ceci, je le remercie encore une fois très chaleureusement.

J'aimerais remercier aussi Messieurs Kadi Bouatouch et Jean Claude Paul d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Etant eux même directeurs de recherche, je leur suis très reconnaissant d'avoir pu trouver le temps de lire avec autant d'attention la première version de ce mémoire. Leurs remarques et critiques m'ont été particulièrement utiles lors de la refonte de ce texte.

J'exprime toute ma gratitude à Madame Corinne Brusque pour avoir accepté d'être membre du jury. Ses compétences expérimentales en matière de radiométrie et photométrie m'ont permis de gagner en rigueur, notamment dans la définition d'un certain nombre de notions, lors de la réécriture du chapitre correspondant.

J'aimerais remercier Madame Françoise Viénot pour m'avoir fait l'honneur, elle aussi, de faire partie de mon jury. Sa grande expérience, sa très large connaissance des sciences de la couleur et ses remarques lors de la soutenance ont clarifié les quelques concepts qui pour moi étaient demeurés obscurs.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Alain Tremeau pour avoir bien accepté d'être membre de mon jury. Ses nombreuses annotations ont permis d'améliorer grandement la qualité de ce manuscrit. Je le remercie aussi pour sa collaboration à la mise au point de l'algorithme de distance présenté lors du dernier chapitre. Puisque nos deux laboratoires, le LISSE et celui de l'Institut d'Ingénierie de la Vision tendent à converger à l'heure actuelle de par la nature de leurs travaux scientifiques, il faut souhaiter que dans un proche avenir des coopérations aussi fructueuses pourront se renouveler.

J'aimerais remercier l'ensemble des membres du laboratoire d'Images de Synthèse de Saint Etienne.

Merci à Marc Roelens, pour tenir à la force des bras l'ensemble du réseau local, et avoir pu, entre autres, récupérer le fichier contenant un chapitre complet de cette thèse, que j'avais égaré par pure inadvertance. Merci à Dominique Michelucci, qui bien que n'étant pas spécialiste de la couleur, a su formuler des remarques tout à fait intéressantes concernant mes recherches, reflétant par là un esprit brillant (quoique malchanceux parfois en matière d'utilisation de l'informatique). Merci à Jean Michel Moreau pour sa bonne humeur constante de géomètre triangulateur. Je dois tout de même lui signaler que je vais peut être arrêter de fumer (euh...). Merci aussi à Grégori Six pour m'avoir notamment bien aidé lors de l'organisation du pot de soutenance, au moyen de ses

talents artistiques indéniables en termes de disposition des petits fours.

J'aimerais remercier l'ensemble des thésards du laboratoire. Merci à ceux avec qui j'ai pu collaborer directement : Jean Luc Maillot (pour sa rigueur et son aide lors du début de cette thèse), Jacques Zaninetti (pour ses jolis images, ses coups de gueules salutaires à mon encontre et ses ballades en caterpillar), Jean Claude Iehl (le Spectral Render Man dorénavant) et Johann Charlot. Merci à tous les autres : Marion, Hervé, Nicolas (Noé), Nicolas (Ponsi), Pierre, Mohamad, Françoise, Philippe, Gilles, Hélimar et tout ceux que j'oublie.

Je remercie Laurent Carraro ainsi que les membres de l'équipe de mathématiques pour m'avoir aidé à surmonter les quelques difficultés où ma maigre culture en la matière m'avait laissée sans ressources.

J'exprime ici toute ma gratitude auprès des personnels et services de l'école qui par leurs compétences m'ont simplifié énormément la tâche. Un remerciement tout particulier à Marie-Line bien sûr, mais aussi à Zahia Mazer et Hélène Sayet. Je remercie les services de reprographie pour avoir, avec diligence, pu tirer les nombreux exemplaires de cette thèse.

Je tiens évidemment à remercier mes parents pour m'avoir soutenu tout au long de ces interminables études. Leur venue, ainsi que celle de ma tante m'aura fait extrêmement plaisir. Merci à ma soeur Hélène, et à son compagnon Grégoire, pour avoir supporté mes trop longues conversations téléphoniques.

J'aimerais saluer mes compagnons de déprime Robin et Patrick. Merci pour leur soutien à distance. Qu'ils soient assurés du mien en retour. Notons que c'est bien la première fois que je mène à bien quelque chose d'aussi important. Comme quoi, même pour des individus de notre espèce, tout est possible.

Un salut spécial pour les parents de Robin (Gilbert et Danièle), dont la gentillesse ne cesse de me jeter dans la plus grande des confusions. Merci d'avoir assisté à ma soutenance.

Nous disions que la nature entière se manifeste au sens de la vue par la couleur. Nous affirmerons maintenant, bien que la chose puisse paraître quelque peu étrange, que l'oeil ne voit aucune forme; le clair, l'obscur et la couleur constituant ensemble ce qui pour l'organe distingue un objet de l'autre, et les parties de l'objet entre elles. Ainsi édifions nous avec ces trois éléments le monde visible et rendons du même coup la peinture possible, laquelle est capable de produire sur la toile un monde visible beaucoup plus parfait que le monde réel.

J. W. Goethe,
Traité des couleurs, Ed. Triades, 3eme Ed., Paris

Table des matières

1	Introduction	17
2	Radiométrie et Photométrie	21
2.1	Introduction	21
2.2	La radiométrie	21
2.2.1	Les grandeurs mesurées et leurs unités	22
2.2.2	Les sources de lumières	22
2.2.2.1	Généralités	22
2.2.2.2	Les sources à décharge dans un gaz	23
2.2.2.2.1	Les lampes au sodium	24
2.2.2.2.2	Les lampes à vapeur de mercure	24
2.2.2.2.3	Les tubes fluorescents	25
2.2.2.2.4	Les lampe au Xénon	26
2.2.2.3	Les sources thermiques	27
2.2.2.3.1	Les radiateurs planckiens	27
2.2.2.3.2	Les lampes à incandescence	29
2.2.2.3.2.1	Les lampes à filament de tungstène	30
2.2.2.3.2.2	Les lampes halogènes	31
2.2.2.4	La lumière du jour	32
2.2.2.5	Les standards proposés par la CIE	32
2.2.2.5.1	L'illuminant standard A	33
2.2.2.5.2	Les illuminants B et C	33
2.2.2.5.3	Les illuminants D	34
2.2.2.6	Autres manières de produire de la lumière	35
2.2.2.6.1	Les LED	35
2.2.2.6.2	Les LASER	35
2.2.3	Interaction de la lumière avec la matière	35

2.2.3.1	Réflexion	36
2.2.3.2	Transmission	38
2.2.3.3	Photoluminescence	40
2.2.4	Instruments de mesure de la radiométrie	41
2.3	La photométrie	42
2.3.1	Définition	42
2.3.2	Les lois de la photométrie	43
2.3.3	Les grandeurs mesurées et leurs unités	43
2.3.4	Instruments de mesure de la photométrie	44
3	Colorimétrie de base	47
3.1	Définition de la couleur	47
3.2	Colorimétrie de base	48
3.2.1	Expériences d'égalisation	48
3.2.2	Repérage des couleurs	50
3.2.3	Détermination des valeurs expérimentales	51
3.2.4	Choix des unités et fonctions colorimétriques	51
3.2.5	Les systèmes CIE	52
3.2.5.1	Expérimentation	52
3.2.5.2	Le système CIE 1931 RGB	53
3.2.5.3	Le système CIE 1931 XYZ	54
3.2.5.4	Le diagramme de chromaticité x,y	57
3.2.5.5	Système colorimétrique supplémentaire, CIE 1964	60
3.2.5.6	Validité de la colorimétrie	60
3.3	Colorimétrie des différences	61
3.3.1	Expérience d'évaluation de seuils	62
3.3.2	Seuils différentiels de chromaticités	62
3.3.3	Diagrammes de chromaticité uniforme	63
3.3.3.1	Solution locale	64
3.3.3.2	Solution par transformation projective	64
3.3.3.3	Solution théorique	66
3.3.4	Espaces de couleurs uniformes	67
3.3.4.1	Espace $L^*u^*v^*$ CIE 1976	69
3.3.4.2	Espace $L^*a^*b^*$ CIE 1976	70
3.3.4.3	Propriétés de ces espaces	71
3.3.5	Formules de différences de couleurs	72

3.3.5.1	Méthode liée aux ellipsoïdes d'égalisation visuelle . . .	73
3.3.5.2	Méthodes liées aux espaces uniformes CIELUV et CIELAB	73
3.3.5.3	Comparaison numérique des formules de distances Luv et Lab	74
4	Mise en oeuvre de calculs spectraux	75
4.1	Le problème posé	75
4.2	Solutions connues	78
4.2.1	Les méthodes d'échantillonnage	78
4.2.1.1	Riemann	78
4.2.1.2	Méthodes d'ordre supérieur	79
4.2.1.3	Gauss-Legendre dans l'espace XYZ	79
4.2.1.4	Gauss-Legendre dans l'espace AC1C2	81
4.2.1.5	Méthode mixte	82
4.2.2	Projection sur une base de fonctions	85
4.2.2.1	Base polynomiale	85
4.2.2.2	Base construite par Analyse en Composantes Principales	85
4.3	Comparaison des méthodes	87
4.3.1	Base de donnée	88
4.3.2	Première série de tests	88
4.3.3	Analyse des résultats	90
4.3.4	Deuxième série de tests	93
4.3.5	Analyse des résultats	94
4.3.6	Conclusion	94
4.4	Méthode adaptative	98
4.4.1	Objectifs de la méthode	98
4.4.2	Etape de pré-traitement	98
4.4.2.1	Choix de l'ensemble de fonctions de base	99
4.4.2.2	Création de la base de données	100
4.4.2.3	Représentation du spectre de la source de lumière . . .	101
4.4.3	Calcul des produits spectre-réflectance	101
4.4.4	Transformation en valeurs de tristimulus XYZ	104
4.4.5	Rappel de l'algorithme	104
4.4.6	Implémentation pratique de la méthode	105
4.4.7	Quelques exemples	105
4.4.8	Tests	107
4.4.8.1	Procédure de test	107

4.4.8.2	Analyse des résultats	109
4.4.9	Conclusion sur la méthode	109
4.4.10	Quelques problèmes non résolus	110
4.4.10.1	Majoration de l'erreur résiduelle	110
4.4.10.2	Utilisation directe de l'espace CIELAB	112
4.4.10.3	Intégration de la méthode dans un lancer de rayons	113
5	La perception de la couleur et ses applications	115
5.1	Introduction	115
5.2	Le système visuel humain	116
5.2.1	L'oeil	116
5.2.1.1	Anatomie de l'oeil	116
5.2.1.2	Le système optique de l'oeil	117
5.2.2	La rétine	117
5.2.3	Voies nerveuses et cortex	121
5.3	Adaptation en luminance	122
5.3.1	Description du phénomène	122
5.3.2	Stimulus lié à la luminosité	123
5.3.2.1	Notion de luminance lumineuse	123
5.3.2.2	Notion de luminance équivalente	123
5.3.2.3	Domaine non-photopique	124
5.3.3	Relation entre le stimulus et la luminosité	126
5.3.3.1	Seuil différentiel de luminance	126
5.3.3.2	Quelques lois reliant la luminance à la luminosité	126
5.3.4	Notion de clarté	127
5.4	Adaptation chromatique	129
5.4.1	Description du phénomène	129
5.4.2	La loi de Von Kries	129
5.4.3	Les lois non-linéaires	131
5.4.4	Constance couleur	132
5.5	La fidélité couleur en synthèse d'images	132
5.5.1	Présentation du problème	132
5.5.2	Utilisation de modèles d'observateurs	134
5.5.2.1	Les méthodes connues	134
5.5.2.2	Exemples de réalisations	136
5.5.2.3	Proposition d'une méthodologie	137

5.5.3	Le moniteur couleur	139
5.5.3.1	La calibration d'un moniteur	139
5.5.3.2	Les limites d'un moniteur couleur	141
5.5.4	Conclusion et perspectives	145
6	Définition d'une distance perceptuelle en synthèse d'images couleurs	147
6.1	Introduction	147
6.2	Travaux antérieurs	148
6.3	La méthode que nous avons développée	149
6.4	Outils nécessaires au calcul de la distance	149
6.4.1	L'acuité visuelle	149
6.4.2	Raffinement de la zone d'étude par segmentation	151
6.4.3	L'espace LLab	152
6.5	La méthode proposée	155
6.5.1	Passage de <i>RGB</i> vers <i>XYZ</i>	155
6.5.2	Le calcul d'une distance pour chaque pixel	155
6.6	Tests	156
6.6.1	Première base de données	156
6.6.2	Résultats	157
6.6.2.1	Analyse statistique	157
6.6.2.2	Image de distance visualisable	158
6.6.3	Deuxième base de données	158
6.6.3.1	Résultats statistiques	160
6.6.3.2	Images de distances	160
6.6.4	Etude des paramètres d'un logiciel de rendu	160
6.6.5	Comparaison avec une distance RMS	162
6.7	Conclusion et développements futurs	163
7	Conclusion	167
	Annexes	169
A	Gauss-Legendre: Méthode mathématique et valeurs numériques	171
A.1	Méthode mathématique	171
A.2	Valeurs numériques	172
A.2.1	Utilisation de Gauss-Legendre dans l'espace XYZ	172
A.2.2	Utilisation de Gauss-Legendre dans l'espace AC1C2	172

B	Analyse en composantes principales: Méthode mathématique	175
----------	---	------------

Table des figures

2.1	Emission du sodium basse pression	24
2.2	Emission du sodium haute pression	25
2.3	Emission d'une lampe à vapeur de mercure	26
2.4	Exemple de source fluorescente	27
2.5	Emission d'une lampe au xénon	28
2.6	Emission absolue de quelques radiateurs planckiens	29
2.7	Emission relative de radiateurs planckiens	30
2.8	Lieu des chromaticités des radiateurs planckiens dans le diagramme u', v'	31
2.9	Emission solaire typique	33
2.10	Les illuminants standard de la CIE	34
2.11	Les différents types de réflexions	36
2.12	La FDRB	37
2.13	Quelques réflectances de matériaux naturels	38
2.14	Un filtre d'absorption plan	39
2.15	Transmittances de quelques filtres	40
2.16	Facteur de réflectance d'un objet fluorescent	41
2.17	Les deux courbes d'efficacité visuelle: V et V'	44
3.1	Champs visuels de 2 et 10 degrés	49
3.2	Coordonnées trichromatiques r, g, b en fonction de la longueur d'onde	54
3.3	Fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$	55
3.4	Fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$	56
3.5	Diagramme CIE xy	58
3.6	Longueur d'onde dominante et pureté d'excitation	59
3.7	Le système supplémentaire CIE 1964	61
3.8	Reproductibilité de la détermination des seuils différentiels de chromaticité	63
3.9	Seuils différentiels de chromaticités obtenus par Mac Adam	64
3.10	Graphiques permettant de déterminer les coefficients $g_{11}, 2g_{12}$ et g_{22}	65

3.11 Découpage en carreaux du diagramme xy	66
3.12 Mise à échelle perceptuelle des carreaux	67
3.13 La surface gauche x,y dans l'espace	68
4.1 Fonctions colorimétriques \bar{a} , \bar{c}_1 et \bar{c}_2	81
4.2 Segmentation du domaine visible	83
4.3 Fonctions de réflectance issues de l'échiquier de Macbeth	89
4.4 Résultats de la première série de test (Partie 1)	91
4.5 Résultats de la première série de test (Partie 2)	92
4.6 Résultats de la première série de test (Partie 3)	93
4.7 Résultats de la deuxième série de test (Source C, méthode de Riemann)	95
4.8 Résultats de la deuxième série de test (Source D6500, méthode BdF ACP)	96
4.9 Fonctions d'échelle	99
4.10 Partitionnement du domaine visible pour le spectre de la source	102
4.11 Exemples d'approximations de fonctions spectrales	106
4.12 Utilisation de la majoration de l'erreur résiduelle	110
5.1 Schéma du système visuel humain	116
5.2 Schéma de l'oeil humain	119
5.3 Structure schématique des connexions nerveuses dans la rétine	119
5.4 Répartition spatiale des photorécepteurs réiniens	120
5.5 Fonctions $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $V_B(\lambda)$	125
5.6 Luminance équivalente en fonction de la chromaticité	125
5.7 Seuil différentiel de luminance en fonction de la luminance de fond	128
5.8 La luminosité de Haubner	128
5.9 Ensemble de couleurs se correspondant pour un changement d'illuminant de la lumière du jour vers une lampe à incandescence	130
5.10 La visualisation en synthèse d'images	133
5.11 La Fonction de Reproduction des Couleur	134
5.12 Quelques images obtenues par Fonction de Reproduction des Couleur	138
5.13 Chromaticités affichables par un moniteur couleur	142
5.14 Lien entre couleurs et luminances pour un moniteur	142
5.15 Décalage vers l'axe neutre	143
6.1 Le champ visuel utilisé	150
6.2 Distribution des poids	151
6.3 Raffinement de la zone d'étude	152
6.4 Images de test et de distance: première base de données	159

6.5	Images de test et de distance: deuxième base de données	161
6.6	Etude portant sur les paramètres et comparaison avec une distance RMS	164

Liste des tableaux

2.1	Efficacité lumineuse de diverses sources de lumière	45
3.1	Valeurs utiles aux calcul de u^* et v^*	69
3.2	Valeurs utiles au calcul des coordonnées $L^*a^*b^*$	71
4.1	Résultats numériques des tests concernant la méthode adaptative	108
4.2	Temps de calculs comparés par rapport à la méthode de référence	109
5.1	Valeurs des paramètres C , S_0 et S_1 en fonction de ϕ	127
6.1	Détermination des paramètres F_S , F_L et F_C	153
6.2	Résultats statistiques pour la première base de données	157
6.3	Résultats statistiques pour la deuxième base de données	160
6.4	Distance RMS: Résultats statistiques pour la première base de données	163
6.5	Classification des distances entre images	166
A.1	Valeurs de poids et longueurs d'ondes pour Gauss-Legendre en XYZ . .	173
A.2	Valeurs de poids et longueurs d'ondes pour Gauss-Legendre en AC1C2 .	174

Chapitre 1

Introduction

Un des objectifs de la synthèse d'images est de créer des images photoréalistes. Pour cela, on simule le comportement de la lumière à l'intérieur d'une scène qu'on a préalablement modélisée. Puis, après avoir recueilli les données calculées, celles-ci doivent être transformées de telle sorte que l'on puisse fabriquer une image visualisable.

L'essentiel de la recherche a, jusqu'à maintenant, porté sur l'amélioration de la simulation. Initialement, les modèles employés étaient extrêmement liés à une vision d'informaticien désirant obtenir des images aussi rapidement que possible. Puis, la puissance des machines augmentant, on s'est soucié d'employer des modèles de plus en plus plausibles physiquement. Ainsi, les calculs s'effectuent dorénavant sur des grandeurs exprimées en unités radiométriques. De même, les modèles de sources de lumière se sont complexifiés, tant au niveau de la géométrie que de l'indicatrice d'émission. Les phénomènes les plus divers d'interaction de la lumière avec le milieu ou avec un matériau peuvent désormais, eux aussi, être pris en compte. Et, au final, les méthodes de rendu les plus célèbres comme le lancer de rayons ou la radiosité permettent des simulations assez complètes de la réalité.

En revanche, l'étape de visualisation est restée jusqu'à récemment délaissée. Par analogie avec l'étape de simulation, on peut dire qu'on en est resté, pour l'essentiel, à une vision d'informaticien désirant afficher des images en couleur, sans se soucier des connaissances acquises par ailleurs en colorimétrie ou science de la vision. L'outil de visualisation lui-même (en général, dans notre domaine, un moniteur couleur) est sous-employé, car ses capacités et ses limitations sont ignorées.

L'objectif de cette thèse est donc de présenter un certain nombre de notions liées au phénomène de la couleur, et d'en proposer quelques applications en synthèse d'images.

Ce mémoire s'articule en cinq chapitres. Les deux premiers présentent une synthèse concernant les domaines de la radiométrie, de la photométrie et de la colorimétrie de base. Les trois derniers concernent la mise en oeuvre des notions présentées pour répondre aux problèmes du rendu spectral, de la visualisation des données, et de l'obtention d'une notion de distance entre images couleurs.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les bases de la radiométrie. Partant

d'un point de vue de spécialiste de la couleur, nous nous préoccuperons essentiellement de l'aspect spectral de la lumière. Pour cela, nous passerons en revue les émissions des sources les plus couramment rencontrées en éclairagisme, autrement dit les sources artificielles (par incandescence ou décharge dans un gaz), et la lumière du jour. Puis, nous nous intéresserons à l'interaction de la lumière avec la matière à travers les cas de réflexion, transmission et photoluminescence. Enfin, la photométrie sera évoquée par l'intermédiaire des grandeurs que l'on y mesure.

Le deuxième chapitre exposera les bases de la colorimétrie. On y expliquera comment à partir d'une expérience fondamentale qui est celle de l'égalisation, on peut repérer des couleurs. On évoquera, dès lors, les principes et choix qui ont conduit à établir des espaces standard. Dans un deuxième temps, on décrira la colorimétrie des différences. Celle-ci s'appuie sur des expériences d'évaluation de seuils et a pour but de quantifier des écarts de couleurs. Le problème de l'obtention d'espaces uniformes sera abordé le plus généralement possible. On présentera, en détail, les espaces uniformes standard connus et utilisés à ce jour.

Le cheminement parcouru au cours de ces deux chapitres relie donc la lumière comme stimulus de la vision à sa perception.

Le troisième chapitre traitera du problème de la mise en oeuvre informatique de calculs de rendu spectraux. La modélisation de l'aspect spectral de la lumière ne pose pas en elle-même de problèmes importants. En revanche, elle induit un surcoût de calculs assez conséquent. On s'intéressera donc à obtenir un algorithme à la fois efficace (en temps et mémoire), et dont les résultats colorimétriques ne pourront être distinguables de ceux obtenus de manière coûteuse. On y rappellera les algorithmes existants, et on comparera leur efficacité. Puis, notre propre méthode sera exposée. Celle-ci s'appuie sur une description adaptative des données spectrales à travers une approche multi-résolution, contrôlée dynamiquement par une évaluation des erreurs colorimétriques commises. Le comportement de cet algorithme sera testé et analysé. Enfin, il sera discuté d'un certain nombre de points permettant d'en améliorer l'efficacité, ainsi que de son implémentation au sein d'un logiciel de rendu.

Dans le quatrième chapitre, on s'attachera à présenter le problème de la visualisation des données. Pour cela, on fera un bref rappel de la physiologie de l'oeil. Les concepts d'adaptation en luminance, et d'adaptation chromatique seront exposés. La visualisation en elle-même sera abordée sous l'angle de la fidélité couleur au sens d'observateurs humains. Les méthodes existantes (valables uniquement pour des images en niveaux de gris) seront passées en revue. Nous présenterons également quelques voies de recherche possibles afin de réellement travailler en couleur, avec le plus de rigueur possible. Enfin, nous donnerons quelques informations concernant l'outil de visualisation. Nous verrons comment obtenir un modèle inverse de moniteur couleur, et comment contourner les limitations techniques qui lui sont inévitablement attachées.

Le cinquième et dernier chapitre sera consacré à la définition d'une distance entre images en couleurs. Après un rappel des méthodes connues, nous présenterons un algorithme en grande partie spécifique au domaine de la synthèse d'image. Celui-ci consiste à comparer les sensations visuelles de deux observateurs que l'on suppose plongés dans

la scène. Pour cela on s'intéressera à la notion de focus d'attention. Les erreurs colorimétriques seront évaluées au moyen d'un espace couleur uniforme récemment défini, l'espace LLab. Cet algorithme sera testé sur un certain nombre d'images de scènes identiques obtenues soit à l'aide de méthodes de rendu différentes, soit avec la même méthode dont on aura fait varier les paramètres en entrée. Enfin, on comparera les résultats de notre algorithme de distance avec ceux issus de la méthode la plus simple consistant à calculer des erreurs pixel à pixel.

Afin de faciliter la lecture du manuscrit, certaines méthodes mathématiques comme l'intégration gaussienne et l'analyse en composantes principales seront exposées en annexe.

Ce mémoire, par égard au sujet qu'il traite, comporte comme il se doit des planches d'images en couleurs. Notons toutefois, que les chaînes d'acheminement de l'information couleur dont l'auteur a pu disposer étant forcément imparfaites, les images restituées ici ne peuvent prétendre en aucun cas à une quelconque fidélité. Elles ne sont là que pour donner une idée des résultats obtenus, sans pouvoir servir de preuves irréfutables.

Chapitre 2

Radiométrie et Photométrie

2.1 Introduction

La lumière est bien évidemment le stimulus responsable des diverses sensations visuelles. Nous allons donc commencer par en étudier les différents aspects physiques. On mènera cette étude dans le domaine physique en s'intéressant tout d'abord à la radiométrie. Puis la photométrie, outil de prédilection des éclairagistes, nous mènera vers une première notion de sensation et donc de subjectivité.

2.2 La radiométrie

L'étude de la lumière peut se faire selon deux approches différentes: ondulatoire et corpusculaire.

Dans le premier cas, la lumière est assimilée à un champ electro-magnétique se propageant dans le vide à une vitesse $c = 299\,792\,458\,ms^{-1}$. Sur un contour fermé l'intégration du débit d'énergie est une puissance exprimée en watt. Dans le cas où les fonctions du temps des champs électriques (\vec{E}) et magnétiques (\vec{H}) sont sinusoïdales, de fréquence ν , on parle d'onde monochromatique.

En ce qui concerne l'approche corpusculaire, on assimile la lumière à un flux de particules: les photons. Ceux-ci ne possèdent pas de masse, se propagent dans le vide à la vitesse c , et transportent une énergie: $E = h\nu$ (où h est la constante de Planck égale à $6.626\,176\,10^{-34}\,Js$). ν est ici la fréquence de la fonction d'onde associée au photon. En fait, depuis De Broglie, on parle de dualité onde-corpuscule, ce qui veut dire que les deux modèles sont aussi valables l'un que l'autre et se complètent. La physique quantique a intégré cette donnée dès ses origines en associant une fonction d'onde à tous les types de particules.

Les cas d'ondes purement monochromatiques (ou de flux de photons tous d'égale fréquence) sont rares. On obtient en général une répartition sur l'ensemble du spectre électro-magnétique de la puissance propagée. Ce fait intéresse au plus haut point les

spécialistes de la couleur qui privilégient l'étude de la *Distribution Spectrale de Puissance* (DSP) de l'onde.

La puissance totale s'obtient comme la somme sur tout le domaine spectral de la DSP, soit $P = \int_0^\infty DSP(\lambda) d\lambda$, $\lambda = \frac{c}{\nu}$ désignant ici la longueur d'onde. Cette notion sera utilisée préférentiellement à celle de fréquence. Il faut noter cependant que la longueur d'onde dépend du milieu parcouru, par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière. Aussi, dans la suite et sauf contre-indication, *les valeurs de longueur d'ondes données le seront dans l'air*¹.

La radiométrie est la mesure de la puissance lumineuse propagée. Et, en tant que spécialiste de la couleur nous nous intéresserons plus particulièrement à la spectro-radiométrie.

2.2.1 Les grandeurs mesurées et leurs unités

En radiométrie, on étudie la répartition spatiale de la puissance lumineuse. Ainsi:

- Le flux émis par une source, rapporté à l'angle solide d'émission et à l'aire apparente de la surface émettrice évalue sa *luminance*², exprimée en $Wm^{-2}sr^{-1}$;
- Le flux émis par la source, rapporté à l'angle solide d'émission évalue l'*intensité*, exprimée en Wsr^{-1} ;
- Le flux émis par la source, rapporté à l'aire émettrice évalue l'*exitance*, exprimée en Wm^{-2} ;
- Le flux reçu par une surface, rapporté à l'aire éclairée, évalue son *éclairage*, là aussi exprimé en Wm^{-2} .

La spectro-radiométrie consiste donc en l'étude de ces grandeurs en précisant leur répartition spectrale de puissance. Par la suite, nous n'allons nous préoccuper que de cet aspect là. Ainsi, la description des différents types de sources, au paragraphe 2.2.2, portera uniquement sur leur DSP, en occultant leur aspect géométrique (dimension, indicatrice d'émission etc...). De même les interactions lumière-matière (2.2.3) seront décrites essentiellement de ce point de vue spectral.

2.2.2 Les sources de lumières

2.2.2.1 Généralités

La production de lumière, malgré une diversité apparente de moyens repose toujours sur le même principe. Lorsque l'on fournit de l'énergie, sous quelle que forme que ce soit,

1. L'indice de réfraction de l'air standard ($T = 15^\circ C$, $P = 101325 Nm^{-2}$) varie dans le domaine visible de: $n = c_{air}/c_{vide} = 1.00027$ à 1.00029 .

2. On parle en général de luminance énergétique par opposition à la notion de luminance lumineuse issue de la photométrie.

à un atome, celui-ci l'absorbe par quanta. Ces quantités discrètes correspondent à des configurations possibles des électrons en orbite autour du noyau. L'atome est alors dit excité car il a atteint un niveau d'énergie supérieur à son niveau minimum de stabilité. Le retour à ce minimum s'effectue par la suite grâce à l'émission successive de différents photons. La différence de niveau entre chaque transition correspond à l'énergie (et donc à la fréquence) du photon émis.

Dans un gaz, les atomes sont très éloignés les uns des autres, aussi on assiste à l'émission de raies caractéristiques des atomes composant le gaz. Lorsque la pression augmente ou que l'on a à faire à des liquides ou des solides, les atomes sont beaucoup plus proches. Aussi les photons émis sont immédiatement réabsorbés par des atomes voisins. Au total, la courbe d'émission spectrale tend à être continue, et de moins en moins caractéristique des matériaux employés.

Les différentes voies technologiques explorées afin de produire de la lumière peuvent être classées de la façon suivante:

- Décharge dans un gaz : un courant électrique traverse un gaz;
- Thermoluminescence : on porte un solide, ou un liquide, à une température supérieure à 1000 K;
- Photoluminescence : comprend deux catégories, la fluorescence et la phosphorescence;
- Electroluminescence : certains solides comme les semi-conducteurs peuvent émettre de la lumière lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique;
- Cathodoluminescence : lorsque l'on bombarde des phosphores par des électrons, les premiers émettent de la lumière;
- Chemiluminescence : lors de certaines réactions chimiques, il peut y avoir production de lumière sans nécessairement génération de chaleur.

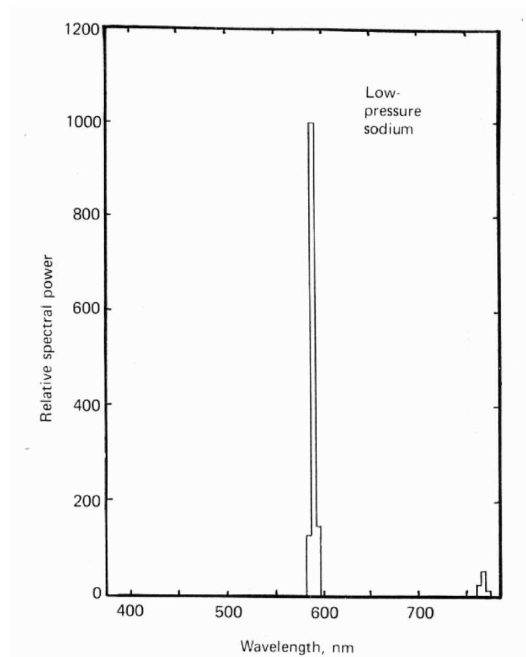
Les deux premières catégories de sources représentent la grande majorité des éclairages artificiels. Aussi, nous allons en détailler quelques caractéristiques.

2.2.2.2 Les sources à décharge dans un gaz

Les gaz ne sont normalement pas conducteurs. Si des arcs électriques, ou la foudre, peuvent se propager dans l'atmosphère, il est autrement plus difficile de produire de la lumière de manière continue.

Le principe des lampes à décharge est de placer un gaz dans un tube en verre, aux extrémités duquel se trouvent deux électrodes. Afin de permettre le passage d'un courant électrique, on chauffe la cathode à l'aide d'une haute tension ce qui a pour effet d'ioniser localement le gaz. Cette opération est celle de l'amorçage. Par la suite, la collision des électrons avec les atomes de gaz permet leur excitation, et donc l'émission de photons.

Passons en revue quelques uns des gaz les plus utilisés.

FIG. 2.1 – *Emission du sodium basse pression*

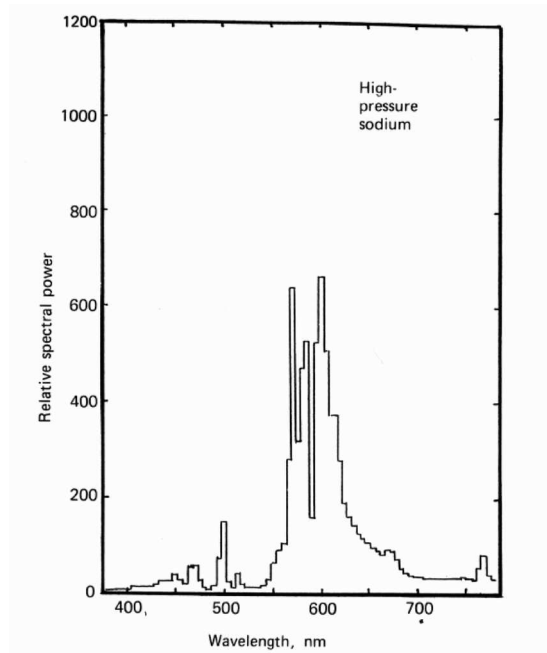
2.2.2.2.1 Les lampes au sodium En utilisant ce gaz à basse pression, on obtient un spectre d'émission ne contenant pratiquement que deux raies. (voir la figure 2.1 extraite de [Hun91])

Ces raies se situant environ au milieu du spectre visible, l'efficacité lumineuse est assez élevée. En revanche on obtient une lumière très jaune et donc avec un rendu couleur assez pauvre³. Ce type de lampe est très souvent employé en éclairage urbain, et notamment à l'intérieur de tunnels.

Lorsque l'on augmente la pression du sodium les collisions entre atomes sont plus fréquentes. Cela a pour effet d'élargir les raies d'émission (voir la figure 2.2, [Hun91]). L'efficacité lumineuse est un peu moindre, mais le rendu couleur est meilleur (car le spectre visible est un peu mieux réparti). La lumière obtenue est rose-orange pâle. Ce type de lampe est aussi employé en éclairage urbain (dans des zones commerciales par exemple). Notons qu'il existe maintenant du sodium blanc.

2.2.2.2.2 Les lampes à vapeur de mercure Le spectre de ce type de source est composé d'une série de raies, avec un continuum très bas (voir la figure 2.3, [Hun91]). Les principales raies sont situées à : 253.7, 365.4, 404.7, 435.8, 546.1 et 578.0 nm. En augmentant la pression du gaz, encore une fois les raies tendent à s'élargir. Cependant,

3. Les notions d'efficacité lumineuse et de température de couleur seront définies plus loin, voir 2.3 et 2.2.2.3.2. Pour l'indice de rendu des couleurs, retenons simplement qu'il reflète la capacité d'une source artificielle à donner aux objets la couleur qu'ils ont lorsqu'ils sont vus en lumière du jour.

FIG. 2.2 – *Emission du sodium haute pression*

l'émission spectrale pour des longueurs d'ondes supérieures à 578 nm, demeure quasi-nulle. La lumière obtenue est de type bleu-vert, et l'indice de rendu des couleurs est assez mauvais.

2.2.2.2.3 Les tubes fluorescents Ce type de source est très employé dans l'industrie et le commerce où une bonne efficacité lumineuse ainsi qu'un bon rendu des couleurs sont nécessaires. Ces lampes sont en fait des lampes à vapeur de mercure traditionnelles dans lesquelles on a rajoutés des phosphore qui, par photoluminescence, vont produire une lumière additionnelle. Comme nous le verrons plus loin, la photoluminescence est le phénomène par lequel une substance absorbe de l'énergie lumineuse, pour la réémettre après un certain laps de temps dans un domaine de longueur d'onde plus élevé. Ainsi le pic d'émission de la lampe à vapeur de mercure situé à 253.7 nm se trouve dans l'ultra-violet, donc en dehors du visible. Mais après absorption et réémission par les phosphores, le spectre de la source se trouve enrichi dans le domaine où traditionnellement ce type de lampe n'émet pas.

Il y a en fait une grande variété de sources fluorescentes, dépendant du type de phosphore employé. La CIE (Commission Internationale à l'éclairage) a proposé douze types de spectres fluorescents (F1 à F12) représentatifs de ce type de source. Cependant, ce ne sont pas des illuminants standard comme présentés ci-dessous (voir 2.2.2.5).

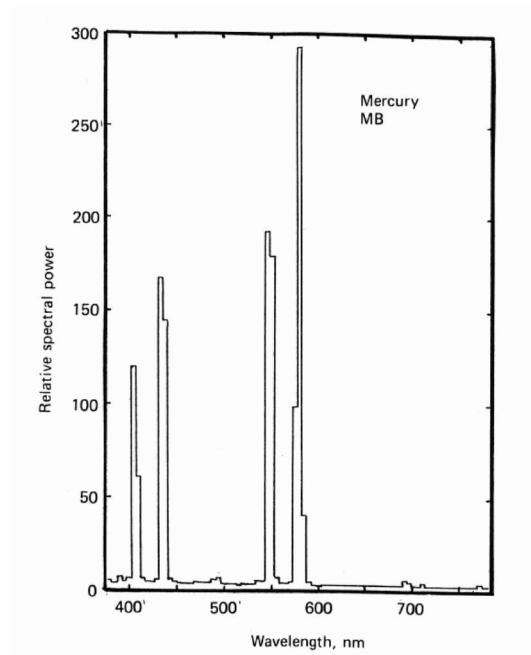


FIG. 2.3 – *Emission d'une lampe à vapeur de mercure*

Les spectres de type F peuvent être subdivisés en trois groupes :

- Normal (F1 à F6). Bonne efficacité lumineuse, et rendu correct malgré une déficience dans le rouge, voir la figure 2.4 extraite de [Hun91];
- Large-bande (F7 à F9). Meilleur rendu couleur, mais efficacité lumineuse plus faible;
- Trois-bandes (F10 à F12). Elles comportent essentiellement trois pics situés à environ : 435, 545 et 610 nm. Bonne efficacité lumineuse et rendu des couleurs correct.

2.2.2.2.4 Les lampe au Xénon Ce dernier type de lampe à décharge est assez intéressant. Comme pour les sources précédentes, le spectre d'émission ne comporte qu'une série de raies à basse pression. Lorsque l'on augmente la pression, on obtient une émission plus continue, qui ici se rapproche de la lumière du jour (voir la figure 2.5, [Hun91]). La décharge électrique peut être entretenue de manière continue, ou par cycle (lampe au xénon pulsée). Ce type de source est employé par exemple dans la photographie au flash et dans les laboratoires de photométrie.

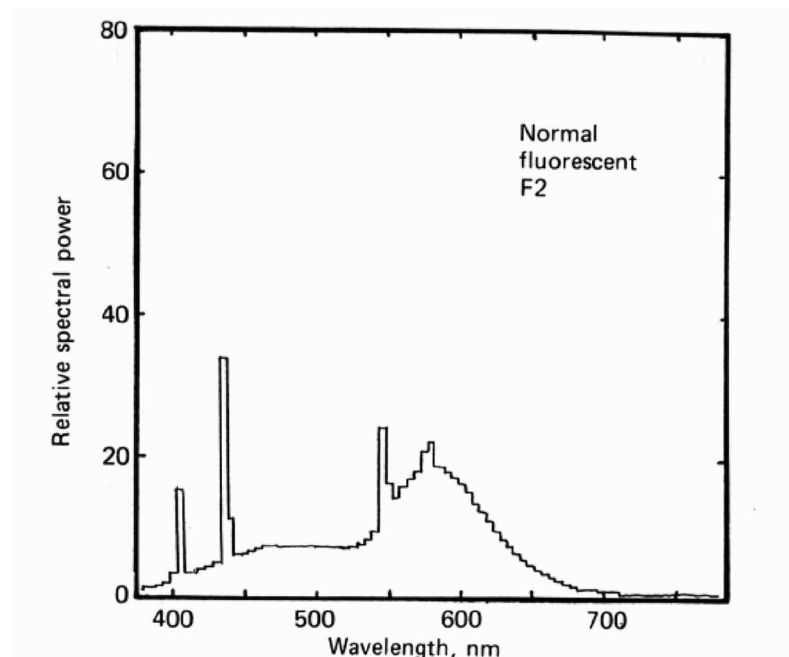


FIG. 2.4 – Exemple de source fluorescente

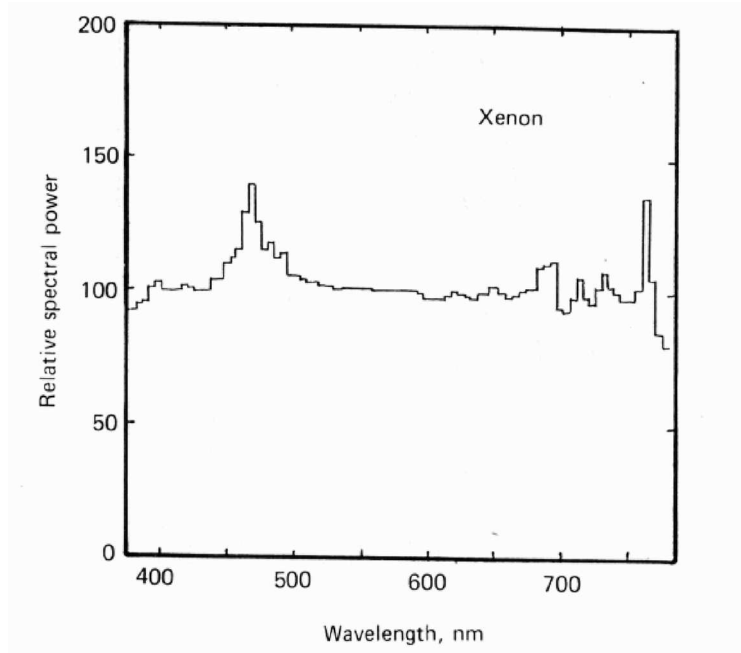
2.2.2.3 Les sources thermiques

Lorsque fournit de l'énergie thermique à un solide ou à un liquide, celui-ci tend à rayonner électromagnétiquement. Comme les atomes dans ces corps sont extrêmement proches, ce rayonnement est spectralement continu. Nous commencerons par étudier le cas théoriques des radiateurs planckiens, puis nous verrons les sources utilisées en pratique.

2.2.2.3.1 Les radiateurs planckiens Planck, au début du siècle, étudia le rayonnement électromagnétique émis par des corps chauffés. Voici ce qu'il stipula:

- Tout corps émet à toute température (sauf au zéro absolu) un rayonnement électromagnétique à spectre continu: *le rayonnement thermique*;
- Pour une température et une longueur d'onde données, le rayonnement ne peut dépasser une valeur maximale obtenue seulement pour un corps particulier: le radiateur thermique idéal ou *radiateur planckien*;
- Pour un corps donné, la luminance énergétique de la surface ne dépend que de la longueur d'onde et de la température.

Le radiateur de Planck possède une émission maximale car il est totalement absorbant. En pratique, on réalise un tel radiateur en perçant un petit orifice dans une

FIG. 2.5 – *Emission d'une lampe au xénon*

enceinte fermée. Aux températures ambiantes, le rayonnement ne se situe pas dans le visible. C'est la raison pour laquelle on parle donc de corps noir. Mais à des températures de quelques milliers de degrés, l'orifice émet de la lumière. Voilà pourquoi il faut préférer le terme de radiateur.

Précisons la nature de ce rayonnement thermique:

- Le rayonnement ne dépend pas de la nature du radiateur (en particulier du corps qui le compose), ni de sa réalisation particulière;
- Le rayonnement n'est pas polarisé;
- la luminance énergétique du radiateur est indépendante de la direction;
- La luminance énergétique spectrale est donnée par la loi de Planck;

Cette loi peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$L_{(e,\lambda)}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\Pi} \lambda^{-5} (\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1)^{-1} \quad (2.1)$$

où:

$L_{(e,\lambda)}$ désigne la luminance énergétique spectrale par rapport à la longueur d'onde, exprimée en $W m^{-3} sr^{-1}$;

λ est la longueur d'onde du rayonnement dans le vide en mètre;

T est la température absolue en kelvin;

c_1 est la première constante radiative, avec $\frac{c_1}{\pi} = 1,191\,044 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2 \text{ sr}^{-1}$;

c_2 est la deuxième constante radiative, avec $c_2 = 1,438\,769 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$.

Cette relation est une fonction de deux variables λ et T . On montre que la luminance $L_{(e,\lambda)}$ croît toujours avec T et qu'elle passe par un maximum pour une valeur particulière de la longueur d'onde λ_m (voir la figure 2.6, [Hun91]). On peut aussi voir que pour des températures inférieures à environ 5600 K, la puissance émise est plus importante pour les grandes longueurs d'onde que pour les courtes. Après 5600 K, la tendance s'inverse (voir la figure 2.7, [Hun91]).

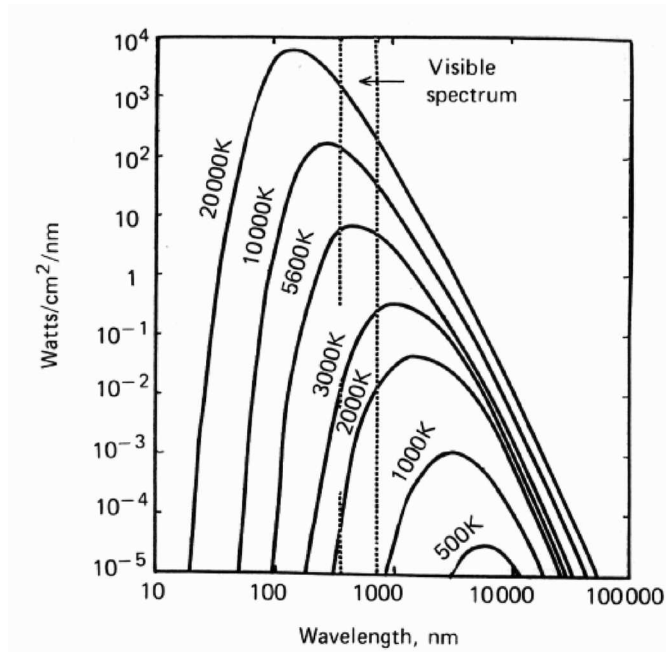


FIG. 2.6 – Emission absolue de quelques radiateurs planckiens

2.2.2.3.2 Les lampes à incandescence Les sources thermiques réelles ont des comportements beaucoup plus complexes que celui du radiateur thermique idéal. Leur rayonnement dépend de la nature du corps émissif et leur luminance est inférieure pour toute longueur d'onde à celle du radiateur de Planck. En particulier, les corps montrent des différences dans leur capacité à rayonner. Ces différences sont caractérisées par l'émissivité.

Dans le cas où cette émissivité est constante (inférieure à 1) dans le domaine du visible, le rayonnement spectral relatif de cette source est le même que celui d'un radia-

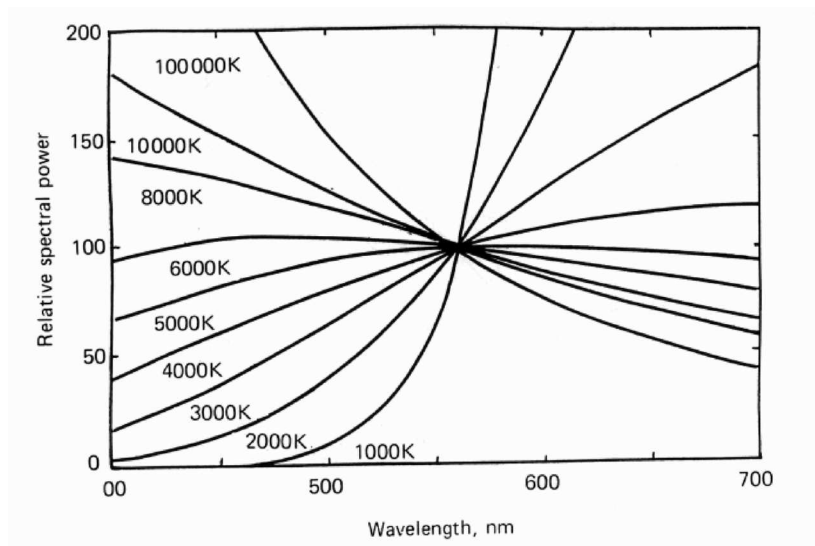


FIG. 2.7 – Emission relative de radiateurs planckiens

teur planckien. Il est alors pratique de caractériser cette source par la température de ce radiateur. On parle alors de *température de répartition*.

Mais on peut aussi recourir à des concept encore plus larges afin de caractériser des sources thermiques réelles. Dans un diagramme de chromaticité⁴, le lieu des radiateurs planckiens se répartit le long d'une courbe (voir la figure 2.8, [Hun91] où le diagramme est de type u,v). Ainsi, on peut associer aux sources thermiques réelles dont la chromaticité se situe sur ce lieu la température du radiateur correspondant. C'est sa *température de couleur*. Pour les sources dont les chromaticités ne sont pas trop éloignées du lieu, on peut associer la température du radiateur le plus proche. On parle alors de température de couleur proximale (ou correlated colour temperature).

2.2.2.3.2.1 Les lampes à filament de tungstène La façon la plus simple de fabriquer une source incandescente est de chauffer électriquement un conducteur. Si cela est réalisé dans l'air, quand la température est suffisamment élevée pour produire une quantité raisonnable de lumière, une oxydation rapide survient et le matériau commence à s'enflammer. Aussi, on enferme le conducteur dans une enceinte contenant du vide ou bien un gaz inerte (krypton par exemple). Le matériau le plus pratique découvert jusque là semble être un filament de tungstène. L'émission spectrale du tungstène est presque constante sur le domaine visible, mais décroît quelque peu pour les grandes longueurs d'ondes. Par conséquent, la distribution spectrale de puissance d'une lampe à filament de tungstène est à peu près la même que celle d'un radiateur de Planck dont la température est plus élevée d'environ 50 K par rapport à celle du filament.

4. Cette notion sera détaillée au chapitre suivant.

2.2.2.4 La lumière du jour

La lumière du jour provient évidemment du soleil. Si à l'intérieur de celui-ci, la température peut atteindre des millions de degrés, on considère qu'à sa surface elle n'est plus que d'environ 5800 K. L'émission extra-terrestre du soleil ne peut pourtant pas se ramener à celle d'un radiateur planckien de même température car elle est bien plus complexe. En effet, les diverses zones du soleil plus ou moins profondes, émettent toutes simultanément, et les plus extérieures ont tendance à réabsorber une partie du rayonnement. D'autre part, le spectre solaire est marqué par un certain nombre de raies d'absorption (plus de 25 000 du proche ultraviolet au proche infrarouge).

Pour nous parvenir, le rayonnement solaire doit aussi traverser l'atmosphère terrestre. Grossièrement, celle-ci se comporte comme un filtre, n'ouvrant que deux zones:

- La fenêtre optique : de 300 nm à 2500 nm de longueur d'onde;
- La fenêtre radio : de 0,1 à 15 m environ.

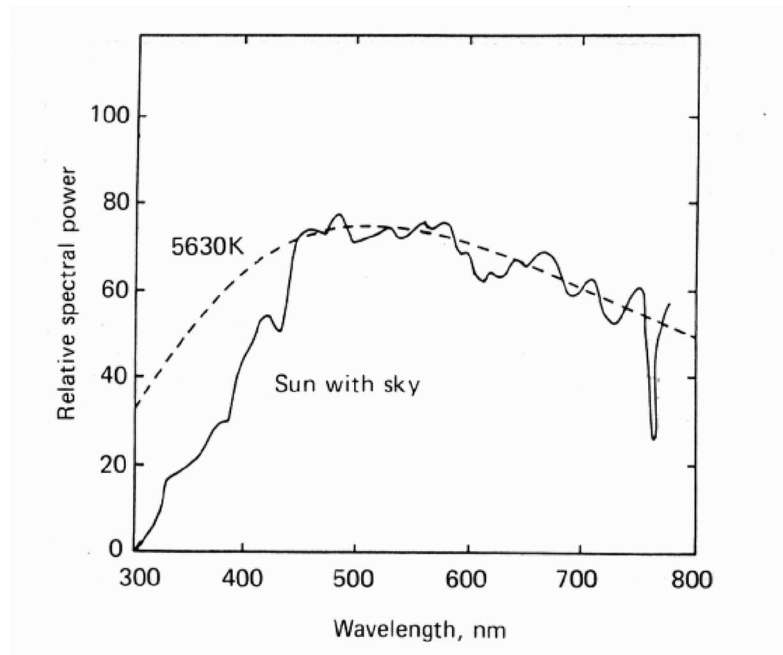
Dans la fenêtre optique, les deux principaux phénomènes de filtrage sont les suivants. Premièrement, il y a absorption par les molécules de différents gaz: principalement l'ozone (en dessous de 300 nm), l'oxygène (bande à 360 nm) et la vapeur d'eau (bandes à 900, 1150, 1400 et 1900 nm). Deuxièmement, aux courtes longueurs d'ondes, la lumière bleue et l'ultraviolet sont diffusées vers l'espace. Cette diffraction dite de Rayleigh est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde, ce qui explique que le ciel soit bleu, le phénomène étant dix fois plus intense à 400 qu'à 700 nm. La figure suivante (voir la figure 2.9, [Hun91]) illustre un éclairement solaire typique nous parvenant, comparé au rayonnement d'un radiateur planckien de température 5630 K.

Par temps clair, 90 % de la puissance lumineuse provient du soleil, et 10 % seulement du bleu du ciel. Par temps complètement couvert, la lumière du soleil et du ciel est diffusée par la masse nuageuse, ce qui a pour effet de produire un éclairement beaucoup plus uniforme spatialement. Si les nuages sont assez bas, la température de couleur proximale atteinte est assez similaire à son habitude (soit environ 5500K). Mais dans le cas contraire, la lumière bleue diffusée par l'atmosphère peut être réfléchiée vers la terre augmentant considérablement sa température⁵. Bien sûr, entre un temps de clair soleil et un temps très couvert, il y a une grande possibilité de variation. Si l'on ajoute à cela que la lumière du jour varie avec le lieu (latitude, longitude), l'altitude, et bien sur le moment de la journée, on peut s'apercevoir que cette notion est difficile à cerner.

2.2.2.5 Les standards proposés par la CIE

Comme on a pu le voir, il existe un nombre important de sources lumineuses. Aussi, afin de fournir aux spécialistes de la couleur un échantillon représentatif, il a été effectué

5. On voit bien là la différence entre température "vraie", mesurée au sol, et température de couleur. Le bleu du ciel par exemple a une température qui peut aller de 15 000 à près de 100 000 K.

FIG. 2.9 – *Emission solaire typique*

une sélection portant à la fois sur les caractéristiques de quelques types de sources et sur leur réalisation matérielle. Quand une telle réalisation est possible, on parle de source standard; sinon, quand seule la distribution spectrale de puissance est connue, on parle d'illuminant standard.

2.2.2.5.1 L'illuminant standard A Il est représentatif des sources à incandescence, et est défini comme le rayonnement dont la répartition spectrale relative d'énergie est donnée par la loi de Planck à une température de 2855,54 K. Cette distribution spectrale a été normalisée en lui attribuant une valeur de 100 pour la puissance émise, à 560 nm. Les valeurs sont données par la CIE tous les 1 nm de 300 à 830 nm.

La réalisation de cet illuminant est une source de type lampe à atmosphère gazeuse et filament de tungstène spiralé, fonctionnant à une température de couleur de 2855,5 K.

2.2.2.5.2 Les illuminants B et C Ils sont représentatifs de la lumière naturelle. Définis en 1931, l'illuminant B est destiné à représenter le rayonnement solaire direct à midi, avec une température de couleur proximale de 4870 K environ. L'illuminant C représente la lumière du jour moyenne à une température de couleur proximale de 6770 K. Leurs sources correspondantes peuvent être obtenues par l'insertion de filtres devant la source A.

Cependant, ces deux illuminants émettent insuffisamment dans le domaine des ultraviolets par rapport à la lumière du jour réelle. De par l'emploi de plus en plus fréquent de matériaux fluorescents, il a fallu remplacer ces standards.

2.2.2.5.3 Les illuminants D En 1963, la CIE proposa un nouveau type d'illuminant représentatif de la lumière du jour. Les illuminants D (comme *Daylight*) sont issus de l'analyse statistique d'un certain nombre de mesures au sol du rayonnement solaire global. La CIE recommande de préférer dans cette classe l'illuminant D65 qui possède une température de couleur proximale voisine de 6500 K et correspond à un rayonnement solaire global typique par temps couvert. Les valeurs spectrales sont données tous les 1 nm de 300 à 830 nm, avec une normalisation de la puissance émise, prenant la valeur 100 à 560 nm.

Pour la lumière naturelle D, la CIE n'a pu proposer de sources correspondantes. Cela est dû à son émission dans le domaine ultraviolet, ainsi qu'à ses fortes irrégularités liées aux bandes d'absorption solaires.

Aussi, malgré son abandon théorique, l'illuminant C continue à être employé, pour des raisons historiques, et parce qu'on peut le réaliser par une source.

La figure 2.10 suivante, extraite de [Sev96], donne la répartition spectrale relative des illuminants A, C et D65.

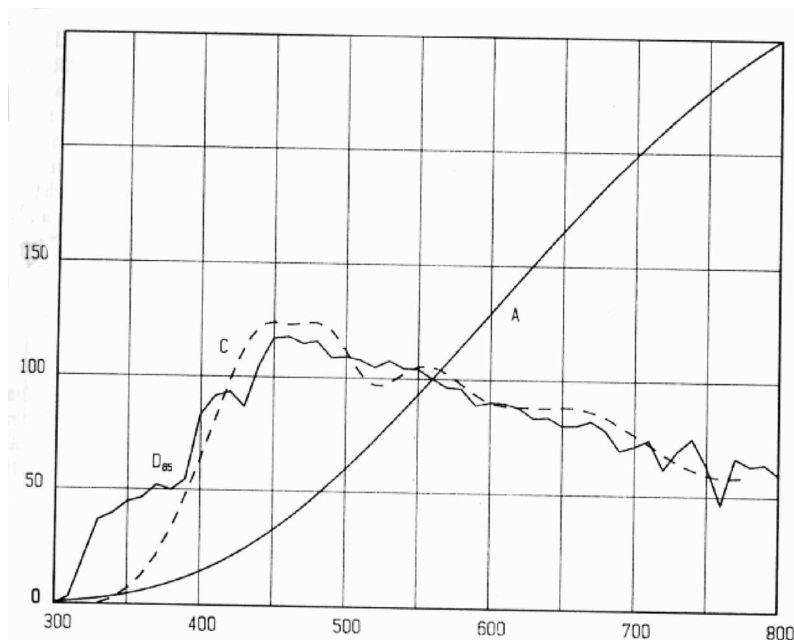


FIG. 2.10 – Les illuminants standard de la CIE

2.2.2.6 Autres manières de produire de la lumière

Les types de sources désignés ici ne sont pas utilisés afin de produire une lumière ambiante. Comme ils sont donc d'un intérêt très relatif pour les éclairagistes, nous allons en évoquer brièvement quelques exemples.

2.2.2.6.1 Les LED Pour fabriquer une LED (Light Emitting Diode), on utilise un matériau semi-conducteur dopé par des impuretés. On crée d'un côté un matériau de type N, avec un excès d'électrons, et de l'autre, un matériau de type P, avec un déficit d'électrons (ou trous). A l'interface des deux se trouve ainsi réalisée une jonction N-P. Lorsque l'on applique une tension suffisante, avec une polarité négative du côté N et positive du côté P, les électrons et trous sont obligés de migrer et de se rencontrer à la jonction, produisant ainsi des photons.

La distribution spectrale de puissance d'une LED est confinée dans une région très étroite. La plupart du temps, l'émission a lieu dans le jaune, le rouge ou l'infra-rouge. En incorporant des phosphores spéciaux, on a pu obtenir des émissions dans le vert. Mais aucune LED actuelle n'émet dans les courtes longueurs d'ondes.

2.2.2.6.2 Les LASER Un laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) émet une lumière cohérente, très monochromatique et très intense. Ce type de source fonctionne sur le principe consistant à envoyer un photon sur une molécule ou un ion déjà excité, ce qui provoque l'émission d'un nouveau photon en phase avec le premier. Ceci provoque une réaction en chaîne multipliant le nombre de photons en phase. Pour augmenter encore la probabilité de tels événements, le chemin des photons excitateurs est augmenté par la présence de miroirs aux deux extrémités du corps auquel on a préalablement fourni une énergie (on parle de pompage, comme pour amener l'eau d'un réservoir au dessus de son niveau normal). Le corps en question peut être solide, liquide ou gazeux. Enfin, l'émission peut être continue (et de faible puissance), ou bien "pulsée" par émissions brèves, mais intenses

2.2.3 Interaction de la lumière avec la matière

Une fois émise, la lumière interagit naturellement avec son environnement. Si l'on s'appuie sur une description corpusculaire, comme on l'a vu plus haut, les photons peuvent être absorbés, réémis, puis réabsorbés par les molécules d'un matériau. D'un point de vue ondulatoire, à l'interface entre un milieu et un autre, l'onde incidente se voit décomposée en une onde réfléchie et une onde transmise⁶.

Nous allons décrire par la suite les phénomènes de réflexion, transmission et photoluminescence de manière assez macroscopique et toujours d'un point de vue essentiellement spectral.

6. Il y a de plus toujours phénomène d'absorption de l'énergie lumineuse (second principe de la thermodynamique oblige), restituée sous forme de chaleur.

2.2.3.1 Réflexion

Une réflexion est un processus par lequel une lumière incidente de longueur d'onde spécifique, au contact avec un matériau, est au moins partiellement retournée vers l'extérieur du matériau sans changement de longueur d'onde.

D'un point de vue spatial, on fait la distinction entre cinq types de réflexions :

- Spéculaire (a) : en suivant la loi de Snell-Descartes, comme sur un miroir parfaitement lisse;
- Diffuse (b) : la lumière est retournée dans toutes les directions avec une égale énergie;
- Mixte (c) : un mélange des deux précédents cas;
- Rétro-propagation (d) : la lumière est retournée dans une direction proche de la direction d'incidence;
- Diffus-directionnel (glossy en anglais) (e) : la lumière est réfléchie à la manière d'un miroir alors que le matériau a une surface irrégulière.

La figure 2.11 suivante, extraite de [Gla95], illustre ces différents cas.

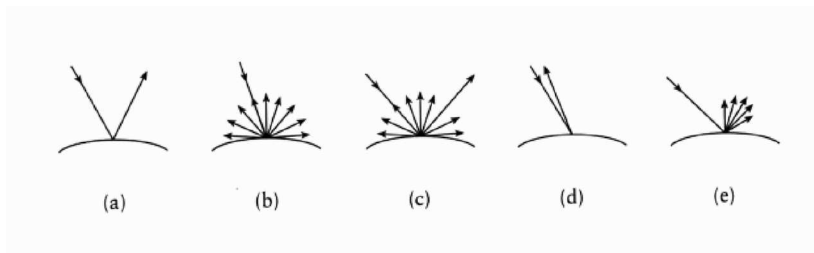


FIG. 2.11 – Les différents types de réflexions

La notion de base est ici la *réflectance*, notée ρ . Elle est le rapport du flux (ou de la puissance lumineuse) réfléchi sur le flux (ou la puissance lumineuse) incidente⁷

La description de cette réflectance mérite de plus amples détails. Comme on le voit, une réflexion dépend d'une part du point de vue et d'autre part de la direction d'incidence. Le rapport des puissances est donc issu d'une intégration pour deux directions, sur certains angles solides. Sous-jacente à la réflectance se trouve donc une autre notion, celle de *Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle* FDRB (plus connue

7. Selon le vocabulaire CIE 1987, le terme *reflectance* en anglais se traduit par *facteur de réflexion* en français. Pour éviter toute confusion avec la notion de *reflectance factor* définie à la fin de ce paragraphe, nous adhérons dans ce manuscrit à une traduction littérale de la terminologie anglo-saxonne, soit : *réflectance* pour *reflectance* et *facteur de réflectance* pour *reflectance factor*.

sous le nom de BRDF en anglais). Elle est le rapport de la luminance réfléchie sur l'éclairement incident, pour des directions données (voir la figure 2.12, extraite de [Mai96]), soit:

$$FDRB(\xi_i, \alpha_i, \xi_r, \alpha_r, \lambda) = \frac{dL_r(\xi_i, \alpha_i, \xi_r, \alpha_r, \lambda)}{dE_i(\xi_i, \alpha_i, \lambda)} = \frac{dL_r(\xi_i, \alpha_i, \xi_r, \alpha_r, \lambda)}{L_i(\xi_i, \alpha_i, \lambda) \cos \xi_i d\omega_i} [sr^{-1}] \quad (2.2)$$

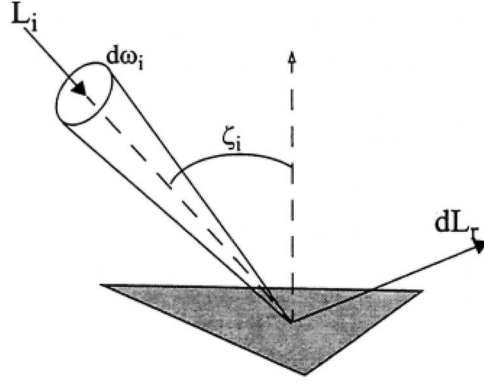


FIG. 2.12 – La FDRB

La réflectance s'obtient alors comme suit:

$$\rho(\Omega_i, \Omega_r, \lambda) = \frac{d\phi_r}{d\phi_i} = \frac{\int_{\Omega_r} \int_{\Omega_i} FDRB(\xi_i, \alpha_i, \xi_r, \alpha_r, \lambda) L_i(\xi_i, \alpha_i, \lambda) \cos \xi_i \cos \xi_r d\omega_i d\omega_r}{\int_{\Omega_i} L_i(\xi_i, \alpha_i, \lambda) \cos \xi_i d\omega_i} \quad (2.3)$$

On peut distinguer trois types d'angles solides: directionnel, conique et hémisphériques. Selon le choix effectué pour l'incidence et la réflexion, on peut obtenir neuf types différents d'intégration, et donc neuf types de réflectance.

Comme on le voit, ρ est une fonction de trois variables. En tant que spécialistes de la couleur, c'est évidemment la longueur d'onde qui nous intéresse le plus. En théorie, il faut donc pour chaque couple de directions incidente et réfléchie, et chaque couple d'angles solides, mesurer une réflectance spectrale. En pratique, on suppose que la réflectance est une fonction à variables séparables, soit: $\rho(\Omega_i, \Omega_r, \lambda) = \rho_{spatial}(\Omega_i, \Omega_r) \rho_{spectral}(\lambda)$. Cela signifie que le comportement spectral du matériau est indépendant de l'incidence et du point de vue. Cela peut se concevoir dans le cas de réflexions diffuses. L'unique mesure spectrale effectuée est le rapport de la puissance réfléchie vers l'hémisphère au dessus du matériau, sur la puissance d'un flux directionnel à incidence normale. Lors d'une réflexion mixte, il semble plus efficace de mesurer deux réflectances spectrales, l'une dans la zone spéculaire l'autre dans la zone diffuse. En tout état de cause, l'hypothèse de séparabilité de la fonction de réflectance doit toujours être confrontée avec les mesures associées au matériau.

Voici, quelques exemples de réflectances à incidence normale (voir la figure 2.13 extraite de [WS82]).

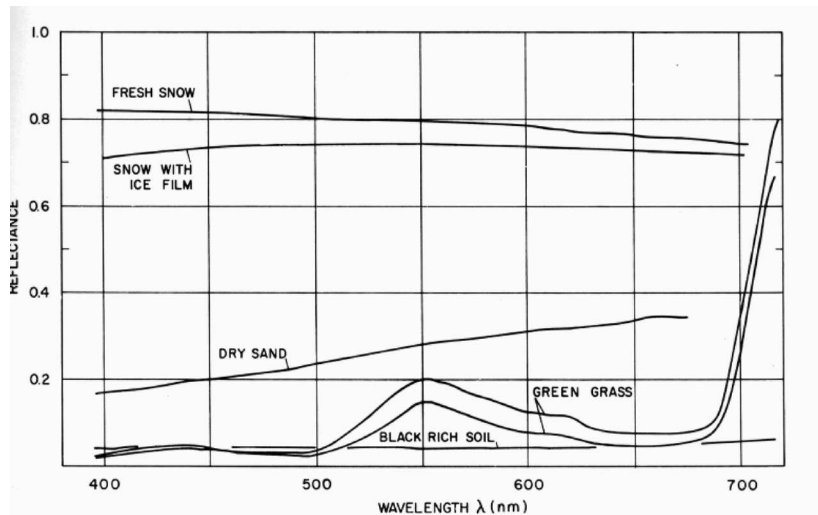


FIG. 2.13 – Quelques réflectances de matériaux naturels

Comme on peut le voir, les fonctions de réflectance ont toutes des valeurs inférieures à un. La distribution spectrale de puissance du flux réfléchi étant égale au produit de la réflectance spectrale par la densité spectrale de puissance du flux incident, soit : $S_r(\lambda) = R(\lambda)S_i(\lambda)$, une réflexion peut se percevoir comme une opération de *filtrage*.

On peut définir une dernière notion : le facteur de réflectance, $\beta(\lambda)$. C'est le rapport du flux réfléchi par une surface sur le flux que réfléchirait une surface parfaitement diffuse dans les mêmes circonstances. La aussi, il existe neuf types de facteurs de réflectance suivant les angles solides utilisés.

2.2.3.2 Transmission

La transmission est le phénomène par lequel une lumière incidente de fréquence spécifique, dans un milieu d'indice de réfraction n_1 , au contact avec un matériau d'indice de réfraction n_2 , est au moins partiellement transmise à l'intérieur du matériau sans changement de fréquence.

On peut définir par analogie les mêmes grandeurs que pour la réflexion, soit la transmittance (rapport de la puissance transmise sur la puissance incidente), et la FDTB (Fonction de Distribution de Transmittance Bidirectionnelle, rapport de la luminance transmise sur l'éclairement incident).

De même, une transmission peut être spéculaire, diffuse ou mixte.

Mais en pratique, le cas le plus fréquemment rencontré est celui de filtre plan d'ab-

sorption. Comme, on peut le voir sur le schéma 2.14 ci-dessous, extrait de [WS82], un certain nombre de réflexions et de réfractions ont lieu entre les deux plans. La transmittance dans ce cas est la mesure globale de la puissance initiale sur la puissance filtrée. Comme à l'entrée et à la sortie du filtre on se trouve dans le même milieu, la notion de longueur d'onde reprend toute sa légitimité.

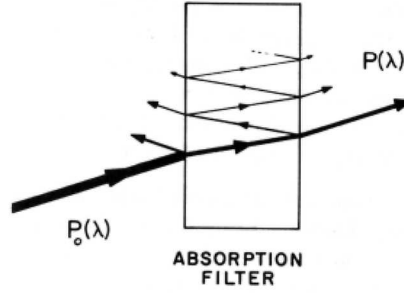


FIG. 2.14 – Un filtre d'absorption plan

Pour des filtres d'absorption homogènes et isotropes, on peut utiliser la loi de Bouguer (1729):

$$\vartheta(\lambda) = 10^{-dm(\lambda)}$$

où d est la longueur du chemin lumineux et $m(\lambda)$ est l'absorption spectrale du milieu. A incidence normale, d est égale à l'épaisseur du filtre. $\vartheta(\lambda)$ est la transmission spectrale interne. En prenant en compte les inter-réflexions qui ont lieu entre les deux parois du filtre, la transmittance est:

$$\tau(\lambda) = \frac{(1 - \rho(\lambda))^2}{1 - \rho(\lambda)^2} \vartheta(\lambda)$$

où ρ est la réflectance de la surface séparant les deux média, soit:

$$\rho(\lambda) = \left(\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right)^2$$

(loi de Fresnel), où n est le rapport entre les deux indices de réfraction. Lorsque l'on procède à la composition de divers filtres en les mettant les uns derrière les autres, et si l'on néglige les réflexions internes, la transmittance globale est le produit des diverses transmittances.

Il faut noter que tout ceci n'est valable que pour des matériaux ayant des comportements spéculaires.

Voici quelques exemples de transmittances (voir la figure 2.15 extraite de [WS82]).

En général, on présente le cas des réflexions d'abord, puis celui des transmissions, en faisant une analogie. Pourtant, il faut bien noter dans le cas des transmissions une

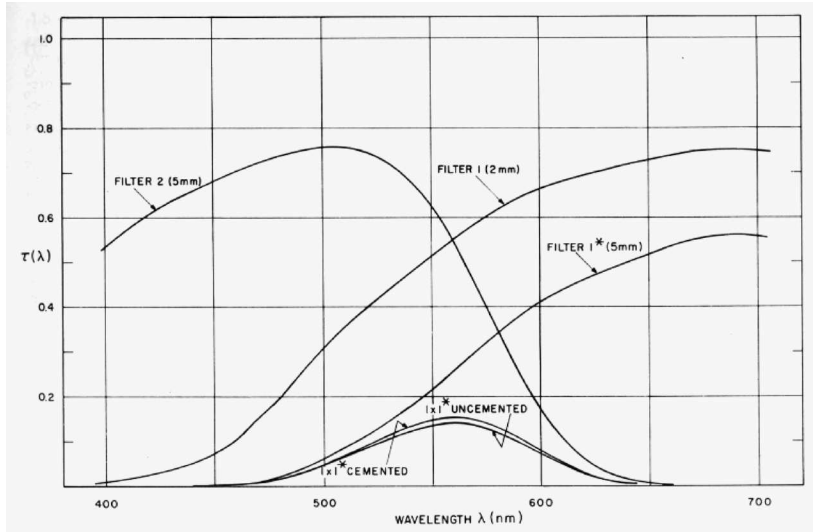


FIG. 2.15 – Transmittances de quelques filtres

différence assez profonde, puisque l'aspect spectral est intimement lié à l'aspect spatial. Le parcours emprunté par la lumière dépend de l'indice de réfraction variable avec la longueur d'onde (comme dans un prisme), et il est moins souvent possible d'émettre l'hypothèse d'une fonction à variables séparables comme pour la réflectance.

2.2.3.3 Photoluminescence

La photoluminescence est le phénomène par lequel un matériau absorbe de l'énergie lumineuse à une certaine longueur d'onde, pour la réémettre plus tard avec une longueur d'onde modifiée (généralement plus grande). Cette réémission est parfaitement diffuse. On distingue deux types de photoluminescence:

- La Fluorescence, pour laquelle le délai de réémission est très court, de l'ordre de 10^{-8} s;
- La phosphorescence, pour laquelle le délai est beaucoup plus long, de 10^{-3} s à éventuellement quelques jours.

Bien sûr, ces caractéristiques varient avec la nature du matériau et d'autres caractéristiques (comme la température, en particulier dans le cas de la phosphorescence).

On peut décomposer le facteur de réflectance lié à ce genre de substance en deux termes: $\beta(\lambda, \sigma) = \beta_s(\lambda) + \beta_l(\lambda, \sigma)$. Dans cette expression, β_s est le facteur dû à la réflexion seule du matériau, et $\beta_l(\lambda, \sigma)$ est le facteur de luminance dû à la photoluminescence seule. σ est la source employée. La somme des deux est une fonction spectrale pouvant dépasser un (voir la figure 2.16, extraite de [WS82]).

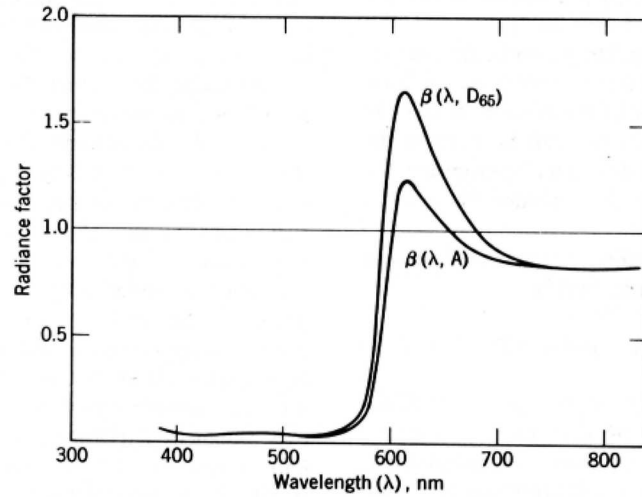


FIG. 2.16 – Facteur de réflectance d'un objet fluorescent

Une autre façon de modéliser la photoluminescence s'obtient en discrétisant les données spectrales, de λ_{inf} à λ_{sup} tous les δ nm, soient n échantillons. Un calcul de réflexion $S(\lambda)R(\lambda)$ s'effectue en multipliant S_i par R_i (i variant de 1 à n). Matriciellement, cela revient à faire le produit d'un vecteur colonne (la source) par une matrice diagonale (la réflectance). Dans le cas d'une photoluminescence, la matrice devient triangulaire inférieure (pour des longueurs croissantes de 1 à n), ce qui rend bien compte de la réémission.

2.2.4 Instruments de mesure de la radiométrie

Un spectroradiomètre est un appareil permettant de mesurer des quantités radiométriques en fonction de la longueur d'onde. Il se compose d'un monochromateur qui permet d'isoler une bande spectrale de la source test. Puis le flux lumineux est dirigé vers un capteur qui mesure la puissance incidente. En général, on se contente de mesures *relatives* en comparant l'émission spectrale de la source test à une source de référence dont la distribution spectrale de puissance est connue. Cette source de référence est la plupart du temps une lampe à filament de tungstène dont la distribution a été déterminée directement ou indirectement par une comparaison spectroradiométrique avec un radiateur planckien.

2.3 La photométrie

2.3.1 Définition

La photométrie est la mesure de la sensibilité de l'oeil humain à la lumière. Cet oeil est bien sûr opérant dans le domaine du visible. Il constitue un appareil de mesure assez complexe, non linéaire dans sa réponse, et variable d'un individu à l'autre. Aussi, il a été établi la notion d'observateur moyen, issu de nombreuses expériences menées sur une large population. La photométrie rend compte d'une sensation visuelle moyenne permettant d'avoir une bonne idée du passage des quantités énergétiques physiquement mesurables aux quantités visuelles.

L'opération essentielle en photométrie est l'égalisation en luminance. Autrement dit, cela consiste à juger si deux luminances produisent la même sensation. Plus précisément, la notion de luminance visuelle peut être définie comme *l'attribut d'une sensation visuelle selon laquelle un stimulus apparaît plus ou moins intense, ou encore selon laquelle la région contenant le stimulus émet plus ou moins de lumière*.

Superficiellement, on peut penser que l'égalisation en luminance est plus élémentaire qu'une égalisation couleur trichromatique (voir chapitre 3), puisqu'une seule variable est en jeu. Or, elle fait intervenir une comparaison entre deux stimuli presque identiques du point de vue luminance, mais différents dans ses autres caractéristiques (teinte et saturation). L'égalisation de luminance hétérochromatiques est donc difficile pour l'observateur. Pour cette raison, on utilise en plus des égalisations directes⁸, des expériences indirectes, notamment par minimum de papillotement⁹ et par des méthodes pas à pas. Ces dernières sont plus commodes pour le sujet et donnent des résultats plus exacts. En toute rigueur, les résultats sont très dépendants de la méthode d'expérimentation ainsi que d'autres facteurs comme le champ de vision et le niveau de stimulation.

Le principe d'égalisation, si les deux sources sont monochromatiques et de même longueur d'onde, revient à établir $v(\lambda)$ et K_m tels que:

$$L_v(\lambda) = K_m v(\lambda) L_e(\lambda) \quad (2.4)$$

- $L_v(\lambda)$ est une grandeur caractérisant la *luminance visuelle*;
- K_m est le coefficient d'efficacité lumineuse;
- $v(\lambda)$ représente la sensibilité de l'oeil;
- $L_e(\lambda)$ est la luminance énergétique.

La courbe de sensibilité visuelle $v(\lambda)$ a été normalisée en 1924 par la CIE, et adoptée en 1933 par la CIPM (Commission Internationale des Poids et Mesures), pour un intervalle de 380 à 780 nm comprenant des valeurs tous les 10 nm, en $V(\lambda)$ (*courbe spectrale*

8. Par juxtaposition de deux surfaces uniformes de même angle visuel.

9. Une même plage est éclairée successivement par les deux sources, et il s'agit d'ajuster la puissance de la seconde jusqu'à ce que le papillotement disparaisse ou soit minimisé.

d'efficacité relative). V atteint une valeur maximale de 1 en 555.016 nm. Cette courbe caractérise la vision diurne (ou photopique) pour des champs de 2 à 4 °. En 1971, $V(\lambda)$ a été modifiée par la CIE (adoptée en 1972 par la CIPM), en étant définie cette fois de 360 à 830 nm par pas de 1 nm.

Une deuxième courbe, $V'(\lambda)$ a été définie par la CIE en 1951 (adoptée en 1976 par la CIPM) caractérisant la vision nocturne (ou scotopique) pour des champs d'au moins 5°. Elle atteint une valeur maximale égale à 1 en 507 nm.

Concernant le type de vision intermédiaire entre scotopique et photopique, le méso-pique, il n'existe pas de courbe de sensibilité spectrale standard.

2.3.2 Les lois de la photométrie

Les lois de base de l'égalisation en luminance sont simples et équivalentes à celles supposées valides pour l'égalisation trichromatiques. Elles sont les suivantes:

- Symétrie: Si un stimulus A égalise un stimulus B, alors B égalise A;
- Transitivité: Si A égalise B et B égalise C, alors A égalise C;
- Proportionnalité: Si A égalise B alors αA égalise αB , où α est un facteur positif par lequel la puissance des stimuli est augmentée ou diminuée, la composition spectrale restant inchangée;
- Additivité: Si A égalise B, C égalise D et que $A+C$ égalise $B+D$, alors $A+D$ égalise $B+C$.

Remarquons que si la loi d'additivité est vérifiée par les grandeurs physiques, c'est loin d'être toujours le cas pour des grandeurs visuelles.

2.3.3 Les grandeurs mesurées et leurs unités

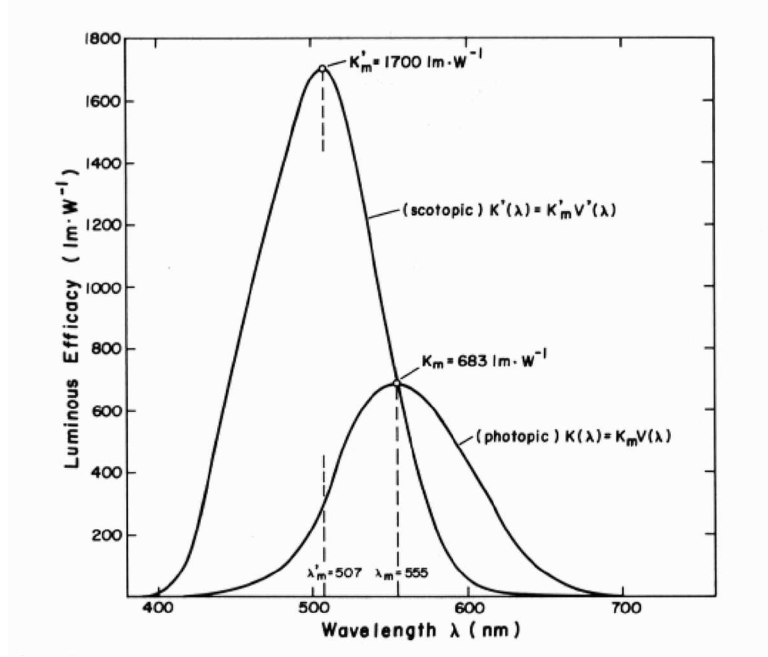
Le lumen peut être défini comme le flux lumineux d'une radiation monochromatique, dont la valeur est de 1/683 W, et la fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hz (soit 555,016 nm dans l'air standard). Ainsi, par définition, l'efficacité lumineuse d'un flux d'émission monochromatique à cette longueur d'onde est de 683 lm/W pour les deux visions (photopique et scotopique), soit:

$$K(\lambda_d) = K'(\lambda_d) = 683 \text{ lm.W}^{-1}$$

avec $\lambda_d = 555.016 \text{ nm}$. On a donc $K_m = 683 \text{ lm.W}^{-1}$ et $K'_m = 1700 \text{ lm.W}^{-1}$. Les deux courbes d'efficacité visuelle figurent sur la figure 2.17, extraite de [WS82].

On peut définir des quantités analogues à la radiométrie, soient:

- $L_v = \frac{dE_v}{d\Omega_r}$ la luminance lumineuse (ou visuelle) en $\text{lm.m}^{-2}\text{sr}^{-1}$;
- $E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$ l'éclairement visuel en lm.m^{-2} ou *cd* (candéla);

FIG. 2.17 – Les deux courbes d'efficacité visuelle: V et V'

- $I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$ l'intensité visuelle en lmsr^{-1} ou lx (lux).

Le domaine de vision photopique est contenu dans une plage de luminance visuelle pouvant être considérée comme s'étendant de quelques cd/m^2 à $10^8 \text{ cd}/\text{m}^2$. Le domaine de vision scotopique s'étend pour sa part de $10^{-6} \text{ cd}/\text{m}^2$ à $10^{-3} \text{ cd}/\text{m}^2$. Enfin, le domaine de vision intermédiaire, mésopique s'étend de $10^{-3} \text{ cd}/\text{m}^2$ à quelques cd/m^2 .

L'efficacité lumineuse d'une source de lumière que nous évoquions plus haut est le rapport de la puissance lumineuse émise sur la puissance énergétique¹⁰.

Quelques ordres de grandeurs pour différentes sources sont donnés dans le tableau 2.1.

2.3.4 Instruments de mesure de la photométrie

Un luminancemètre est un appareil mesurant une luminance visuelle. Le signal lumineux est analysé par un spectro-photomètre puis intégré numériquement via une fonction de filtrage reproduisant $V(\lambda)$. Notons qu'il existe aussi des luminancemètres équipés d'un filtre $V'(\lambda)$.

Un spectrophotomètre peut être utilisé pour la mesure de facteurs de réflectance et de transmittance.

¹⁰ La puissance énergétique est celle du flux lumineux émis. Il ne faut pas la confondre avec la puissance électrique. Ainsi une ampoule de 60 W électrique émet moins de 60 W lumineux.

Source de lumière	Efficacité lumineuse en lm/W
Tungsten (40 W, 240 V)	10
Tungsten (100 W, 240 V)	13
Tungsten halogen	21
Xenon	25
Fluorescent trois bandes	93
Sodium haute pression	100
Sodium Basse pression	150

TAB. 2.1 – *Efficacité lumineuse de diverses sources de lumière*

Chapitre 3

Colorimétrie de base

3.1 Définition de la couleur

Q'est ce que la couleur? Ou plus précisément qu'est ce que la couleur pour l'être humain? En effet, on sait que la plupart des mammifères non primates (comme le chien, le chat ou le cheval), perçoivent des couleurs. On pense même que certains oiseaux ou poissons ont une perception plus élaborée que l'homme (en terme d'analyse spectrale, et de largeur du domaine visible, notamment vers l'ultraviolet). La notion de couleur est donc indissociable du sujet récepteur.

Comme on le sait, l'oeil est le siège des sensations en rapport avec la lumière¹. Par l'intermédiaires de récepteurs photo-chimiques placés dans la rétine, il transforme l'énergie lumineuse reçue en impulsions nerveuses. Ces impulsions sont alors immédiatement analysées afin de construire une intelligibilité des signaux lumineux. C'est la *perception*. Celle-ci peut se décomposer en diverses classes d'apparence (qui sont autant de grilles d'analyse): la forme, la couleur, la brillance (liée à la micro-structure de la surface des objets, voir la notion de FDRB au chapitre précédent), la transparence et la texture. Notons que toutes ces classes sont fortement imbriquées. Ainsi, une eau circulante est analysée comme la résultante de son mouvement, de sa transparence et de sa brillance.

La couleur n'est donc qu'une des classes d'apparence liée à la perception de la lumière. Elle diffère toutefois fondamentalement des autres dans le sens où elle ne peut être confortée dans son analyse par aucun autre sens. La forme ou la texture par exemple peuvent être étudiées par le toucher. La seule façon de décrire la couleur est le langage. On aborde là l'aspect de *cognition*. Comment désigner la couleur? On peut lui attribuer une teinte: rouge, vert, jaune, bleu, violet. Mais ce n'est, en général, pas suffisant. Il faut ajouter les notions de niveau de pureté (ou saturation), et de luminosité (pour les sources) ou clarté (pour les objets)². On parlera alors de bleu pâle, vert foncé,

1. Ajoutons ici que, même en l'absence de stimulus visuel, il peut y avoir création de sensations. Ce peuvent être des phosphènes (taches de lumières perçues lorsque les paupières sont closes), des rêves, des images mémorisées ou bien encore des hallucinations.

2. Nous reviendrons sur ces deux notions (luminosité et clarté) lors du paragraphe 5.3

jaune vif. A ce niveau cognitif, divers aspects culturels peuvent aussi intervenir. Les désignations peuvent être connotées: jaune citron, blanc comme neige. De par ce premier aspect (subjectif, et variable d'une personne à l'autre), le langage courant est insuffisant pour donner réellement prise sur le phénomène couleur. Aussi diverses tentatives ont été menées afin de construire des collections de couleurs précisément définies par leurs appellations. On peut citer ici le système de Chevreul, édité vers 1838. Celui-ci contient près de 35 000 écheveaux ordonnés de fibres teintées, à l'usage de la manufacture des Gobelins. Les collections en usage à l'heure actuelle sont les systèmes de Munsell, OSA et DIN. Mais nous butons là sur une nouvelle difficulté liée à l'usage du langage. On estime en effet que l'on peut percevoir quelques centaines de milliers de couleurs différentes (voir [Sev96] pour une discussion sur ce point). Ce nombre semble dépasser de beaucoup les moyens d'un vocabulaire même extrêmement précis.

La *colorimétrie* est la science de la mesure de la couleur. Basée sur la théorie trichromatique et la notion d'observateur moyen, elle permet d'associer trois chiffres à chaque couleur. Munie d'une méthodologie très stricte, elle offre une désignation précise et objective. Ses applications sont par ailleurs fort nombreuses. Elle permet de fabriquer des produits dont la couleur est conforme à un modèle. Elle autorise la restitution de couleurs au travers de différents médias (photo, film, TV). Elle permet enfin la mise au point de sources de lumière.

La colorimétrie semble donc être la réponse universelle, et objective, au problème du discernement et de la désignation des couleurs. Il faut pourtant nuancer fortement ce propos. La colorimétrie n'est pas la science de la couleur à elle toute seule. En fait, elle est le résultat historique de l'étude de la couleur abordée d'un point de vue essentiellement physique. Les aspects physiologiques, psychologiques et cognitifs sont en partie ou complètement ignorés. Ainsi l'égalisation trichromatique, fondement de la colorimétrie, s'effectue pour des conditions de vision extrêmement simplifiées (une surface uniforme entourée d'un fond achromatique), isolées des autres classes d'apparence. La couleur n'est plus alors fonction que de la répartition spectrale de la lumière, analysée par trois types de cellules réceptrices. Les autres traitements de l'information effectués par la rétine, ou par les voies d'acheminement nerveuses et le cortex ne sont pas pris en compte. Nous reviendrons lors du chapitre 5 sur ce que l'on peut nommer une colorimétrie avancée.

3.2 Colorimétrie de base

3.2.1 Expériences d'égalisation

L'expérience de base en colorimétrie est celle de l'égalisation couleur, où il s'agit de comparer pour un observateur, un stimulus visuel, à un stimulus de référence. Les stimuli présentés sont des champs visuels uniformes, entourés d'un fond achromatique. Ces champs sont assimilés à des *couleurs d'ouverture*, autrement dit des champs lumineux sans structure, perçus comme des brouillards non localisés (comme par exemple le bleu du ciel). Notons là un premier problème, car la colorimétrie est souvent utilisée pour

des objets.

- Si ceux-ci interagissant avec la lumière, on parle de *couleur de surface*;
- Si ceux-ci paraissent émettre de la lumière, on parle de *couleur lumière*.

En toute rigueur, c'est utiliser la colorimétrie en dehors de son cadre théorique d'application.

Les deux types d'égalisation les plus fréquemment employés sont *l'égalisation directe*, et *l'égalisation par minimum de papillotement*³. L'égalisation directe est la plus simple à réaliser, et d'ailleurs, historiquement, la première à avoir été employée. Les deux stimuli sont présentés côte à côte, séparés par une ligne aussi fine que possible. La figure 3.1, issue de [Sev96], lorsqu'elle est vue à une distance de 28 cm, illustre des exemples de champs visuels présentés à un observateur. L'égalisation par minimum de papillotement consiste à présenter alternativement, le stimulus de référence et le stimulus visuel. Pour une fréquence faible (de l'ordre de 5 Hz), on observe un papillotement. Pour une fréquence plus élevée (de l'ordre de 35 Hz), il y a fusion des champs. Il s'agit donc de travailler à un fréquence intermédiaire (environ 20 Hz), et de demander à l'observateur d'annuler ou au moins de minimiser le papillotement résiduel, en effectuant l'égalisation des champs.

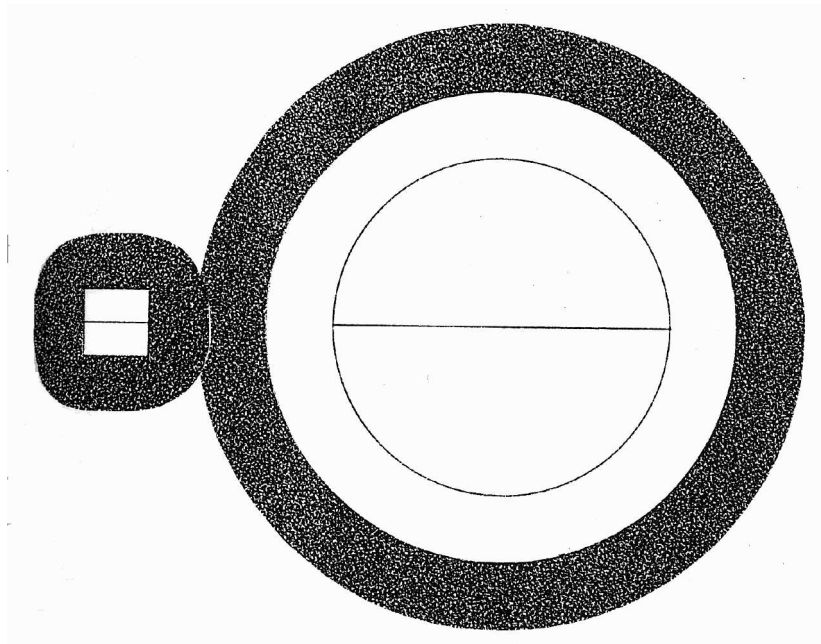


FIG. 3.1 – Champs visuels de 2 et 10 degrés

3. Ce fait a déjà été signalé au chapitre précédent pour l'égalisation en luminance.

Quel que soit le type d'égalisation employé, les conditions expérimentales doivent toujours être soigneusement spécifiées, soit:

- Le niveaux lumineux des stimuli;
- La taille du champ visuel;
- Le champ environnant;
- Le niveau d'adaptation;
- La durée de présentation des stimuli;

Les résultats obtenus sont très dépendants de ces conditions, d'où une certaine disparité entre les nombreuses séries de données issues des expériences menées au cours de ce siècle.

3.2.2 Repérage des couleurs

Young, le premier, a émis l'hypothèse de l'existence de trois photorécepteurs dans le système visuel humain. Puis Maxwell a démontré la validité de cette hypothèse trichromatique. En particulier, il a montré l'équivalence visuelle d'une lumière quelconque avec des combinaisons de trois lumières convenablement choisies, les *primaires*, équivalence d'où résulte le repérage de son aspect coloré.

La combinaison des primaires est réalisée par additivité. Pour illustrer ce principe, on peut, par exemple, projeter sur un écran deux faisceaux de lumières différentes. Dans la zone d'intersection des deux projections, se trouve réalisée un mélange additif de lumière. En pratique, pour les expérience d'égalisation, on utilise un *colorimètre visuel*, où l'on présente les stimuli via un système optique. Il s'agit alors, par un mélange additif des primaires, d'obtenir un mélange reconstituant la couleur en essai. Pour chaque égalisation, on demande à l'observateur de procéder à une égalisation chromatique, puis d'ajuster la luminance, tout en conservant le caractère chromatique.

Le choix des primaires est assez libre. Celles-ci sont en général très saturées, mais cela n'est théoriquement pas nécessaire. Il suffit en fait que les primaires soient indépendantes, autrement dit qu'aucune d'entre elles ne puisse être obtenue comme combinaison des deux autres. En pratique, on prend souvent des lumières monochromatiques car elles sont très faciles à spécifier.

Notons ici, une différence très remarquable avec le système auditif. L'oreille humaine effectue une analyse spectrale des sons assez fine (en permettant d'isoler les graves des aigus par exemple). Pour obtenir une identité perceptuelle entre deux stimuli sonores, il faut quasiment évaluer leurs distributions spectrales. En revanche, du fait de la trichromaticité, le système visuel humain effectue une analyse spectrale bien moins fine. Le mélange de rouge et de vert donne du jaune, sans que l'on puisse en séparer les constituants. De même, l'addition de trois primaires monochromatiques ne permet évidemment pas de reconstituer tous les spectres possibles. Pourtant, ces trois primaires

sont suffisantes pour égaler l'ensemble des couleurs discernables (dans une certaine plage d'énergie lumineuse). Les stimuli de compositions spectrales différentes et de couleurs identiques sont dits *métamères*.

3.2.3 Détermination des valeurs expérimentales

Pour un choix de primaires donné (notées $[R]$, $[G]$, $[B]$), et un stimulus $[S]$, l'égalisation obtenue permet d'écrire:

$$[S] \equiv R[R] + G[G] + B[B] \quad (3.1)$$

Cette écriture symbolise une *équivalence visuelle*, d'où le signe \equiv entre le stimulus $[S]$ et un mélange additif (+) des trois primaires expérimentales. Les nombres R , G , B représentent les quantités de ces primaires. Ce sont les *composantes trichromatiques* (tristimulus values en anglais). Elles supposent par ailleurs un dispositif de mesure et des unités.

Notons que parfois, l'une des composantes trichromatiques peut être négative. On peut donc écrire par exemple:

$$[S] \equiv -R[R] + G[G] + B[B] \quad (3.2)$$

ou encore:

$$[S] + R[R] \equiv G[G] + B[B] \quad (3.3)$$

Cela revient, en fait, à procéder à une égalisation visuelle en additionnant au stimulus de référence une certaine quantité de la primaire concernée. Cette primaire change donc pour l'occasion de champ visuel.

3.2.4 Choix des unités et fonctions colorimétriques

Le seul moyen de spécifier des unités est d'avoir recours à des mesures radiométriques. Mais cela pose deux problèmes. Premièrement, ces mesures sont difficiles à effectuer, car des primaires monochromatiques ont, par définition, une largeur spectrale très étroite. Deuxièmement, les trois nombres obtenus sont très disproportionnés. Ainsi, la valeur de B est souvent très faible par rapport aux deux autres. En effet, si le bleu participe à la chromaticité du stimulus, il contribue énergétiquement très peu à sa luminance. Le système CIE 1931 a contourné cette difficulté comme nous le verrons plus loin.

Une fois les unités fixées, on peut alors tracer les *fonctions colorimétriques*. Elles permettent de calculer facilement les composantes trichromatiques d'une lumière polychromatique. Elles sont notées avec les mêmes lettres que les primaires leur correspondant, en minuscule surmonté d'une barre, soient pour $[R]$, $[V]$, $[B]$: $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$.

Supposons que le stimulus $[S]$ corresponde à une lumière dont la distribution spectrale de puissance est nulle sur l'ensemble du domaine visible, sauf sur une petite bande

de longueurs d'onde autour de λ_0 , où elle vaut $DSP(\lambda_0)$. Si l'on a défini des unités, pour un signal de valeur 1 autour de λ_0 , les composantes trichromatique du stimulus correspondant sont: $\bar{r}(\lambda_0)$, $\bar{g}(\lambda_0)$ et $\bar{b}(\lambda_0)$. Donc, pour [S], on a $R = DSP(\lambda_0)\bar{r}(\lambda_0)$, $G = DSP(\lambda_0)\bar{g}(\lambda_0)$ et $B = DSP(\lambda_0)\bar{b}(\lambda_0)$. Si l'on considère maintenant un stimulus dont la DSP est un ensemble de valeurs discrètes $DSP(\lambda_i)$ ($1 \leq i \leq n$) sur l'ensemble du spectre visible, alors les composantes trichromatiques sont la somme des composantes calculées sur les λ_i , soient:

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} DSP(\lambda_i)\bar{r}(\lambda_i); G = \sum_{i=1}^{i=n} DSP(\lambda_i)\bar{g}(\lambda_i); B = \sum_{i=1}^{i=n} DSP(\lambda_i)\bar{b}(\lambda_i) \quad (3.4)$$

et par passage à la limite (du discret vers le continu), on a :

$$\begin{aligned} R &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} DSP(\lambda)\bar{r}(\lambda) d\lambda; \\ G &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} DSP(\lambda)\bar{g}(\lambda) d\lambda; \\ B &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} DSP(\lambda)\bar{b}(\lambda) d\lambda; \end{aligned} \quad (3.5)$$

où λ_{inf} et λ_{sup} sont les bornes du visible, et k un coefficient de proportionnalité dont la valeur dépend du choix des unités et des primaires.

3.2.5 Les systèmes CIE

La détermination par Maxwell des composantes trichromatiques n'était pas très précise. Aussi, ses travaux furent repris successivement par König et Dieterici, peu avant 1890, puis par Abney en 1900 et Troland en 1920. Enfin, Guild commença peu après 1926 des travaux qui, étendus par Wright, permirent de proposer un système précis. Ce sont ces travaux qui furent adoptés, en 1931, par la CIE en tant que standard.

3.2.5.1 Expérimentation

Les mesures de Guild furent faites sur un champ visuel carré sous-tendant un angle de 2 degrés. Ce champ fut choisi pour rester en vision fovéale (voir chapitre 5). Les primaires étaient obtenues par une source à incandescence, filtrée sélectivement pour donner des lumières presque monochromatiques, de longueurs d'onde dominante: 630, 543 et 460 nm. Les déterminations de Guild furent effectuées avec 7 observateurs.

Les travaux de Wright bénéficièrent des remarques de Guild et commencèrent par l'élaboration d'un colorimètre plus adapté. Les mesures étaient faites avec des primaires obtenues à l'aide d'un monochromateur, de longueurs d'onde 650, 530 et 460 nm. Là encore, l'observation se faisait de façon monoculaire, pour un champ de 2 degrés, avec un fond noir. Dix observateurs réalisèrent en 1929 les mesures, qui furent publiées peu après.

3.2.5.2 Le système CIE 1931 RGB

Les primaires instrumentales des deux expériences précédemment décrites étant différentes, Guild a proposé pour unifier les résultats de choisir les primaires suivantes :

- R 700,0 nm;
- G 546,1 nm;
- B 435,8 nm.

Ce sont les primaires du système RGB 1931.

Les mesures de Guild et Wright ont porté sur des quantités relatives: les coordonnées trichromatiques (ou chromaticités), notées r , g , b , qui sont obtenues comme le rapport de chaque composante, sur la somme des trois composantes, soient :

$$r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (3.6)$$

Nous reviendrons sur cette notion, lorsque nous parlerons des diagrammes de chromaticités. Guild et Wright ont proposé de fixer arbitrairement des unités telles que les coordonnées trichromatiques du neutre d'égale énergie soient toutes trois égales à $\frac{1}{3}$. Sur la figure 3.2, extraite de [Sev96], sont représentées les coordonnées trichromatiques r , g , b des rayonnements monochromatiques en fonction de la longueur d'onde (travaux de Wright). Connaissant donc, les fonctions $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ et $b(\lambda)$, il s'agit de déterminer les fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$.

On a par définition :

$$r(\lambda) = \bar{r}(\lambda) / (\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda))$$

soit :

$$\bar{r}(\lambda) = r(\lambda)(\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)) = r(\lambda)s(\lambda)$$

Pour les coordonnées b et g , les relations sont similaires. On se ramène donc au problème d'identifier la fonction $s(\lambda)$. Or, les valeurs lumineuses qui correspondent aux trois unités chromatiques de primaires sont : $L_r = 1,0000$, $L_g = 4,5907$ et $L_b = 0,0601$. La valeur lumineuse d'un flux peut s'obtenir au moyen de la fonction $L(\lambda)$, proportionnelle à l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ (adoptée peu avant en 1924 par la CIE), et résultant de la somme pondérée des trois fonctions colorimétriques, soit :

$$L(\lambda) = 1,0000\bar{r}(\lambda) + 4,5907\bar{g}(\lambda) + 0,0601\bar{b}(\lambda) = kV(\lambda)$$

où k est un nombre indépendant de la longueur d'onde. Si on utilise les relations présentées plus haut, on peut remplacer les fonctions colorimétriques et obtenir :

$$(1,0000r(\lambda) + 4,5907g(\lambda) + 0,0601b(\lambda))s(\lambda) = kV(\lambda)$$

d'où,

$$s(\lambda) = \frac{kV(\lambda)}{1,0000r(\lambda) + 4,5907g(\lambda) + 0,0601b(\lambda)}$$

Cela détermine alors les trois fonctions colorimétriques. Elles sont représentées sur la figure 3.3, extraite de [Sev96].

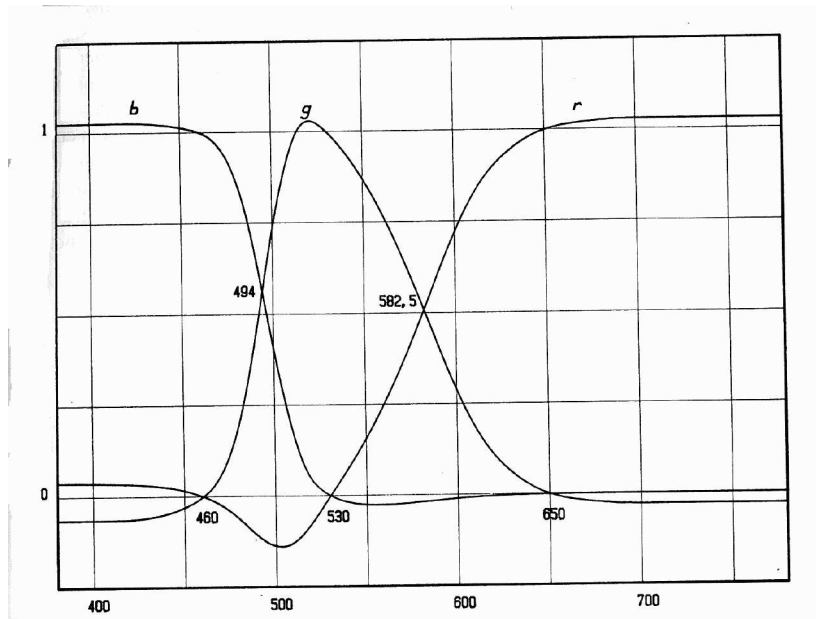


FIG. 3.2 – Coordonnées trichromatiques r , g , b en fonction de la longueur d'onde

3.2.5.3 Le système CIE 1931 XYZ

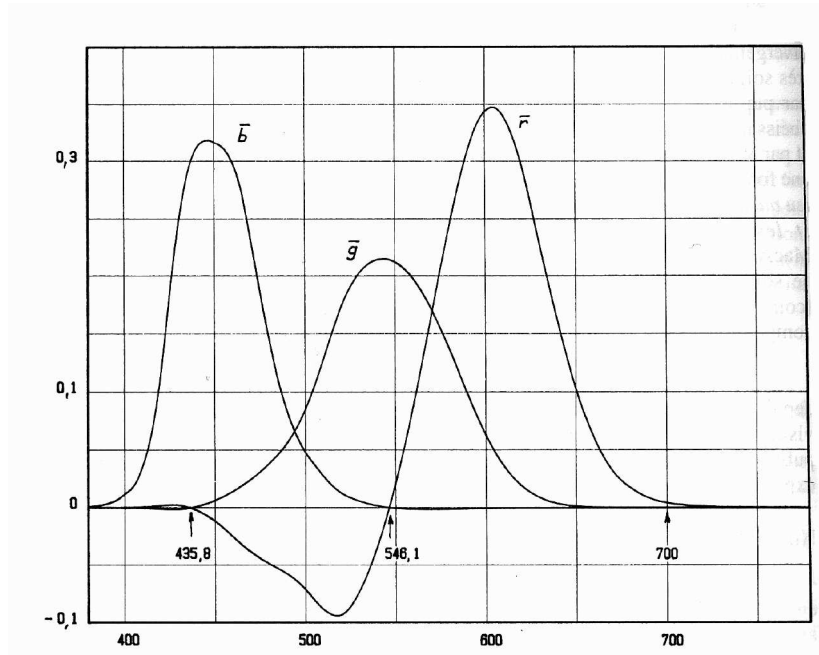
Quand le système RGB proposé par Guild et Wright apparut, celui-ci fut critiqué du fait des valeurs négatives que les fonctions colorimétriques pouvaient prendre. Cela pouvait être source d'erreurs numériques. Judd étudia donc un nouveau choix de primaires X , Y , Z qui pourrait résoudre ce problème. Un changement de primaires revient à réorienter les axes de l'espace couleur, et mathématiquement à effectuer un changement de repère par produit matriciel.

La matrice de passage de RGB vers XYZ est la suivante.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Les primaires X , Y , Z définies sont uniquement théoriques, et ne peuvent être obtenues, physiquement.

- X est une primaire rouge, dont la saturation est supérieure à n'importe quel rouge atteignable;
- Y est une primaire verte, possédant la même teinte qu'une primaire monochromatique de longueur d'onde 520 nm, avec une saturation supérieure;

FIG. 3.3 – Fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$

- Z est une primaire bleue, possédant la même teinte qu'une primaire monochromatique de longueur d'onde 477 nm, avec une saturation supérieure;

Les fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ sont toutes positives, sur le domaine du visible. De plus, la fonction $\bar{y}(\lambda)$ a des valeurs proportionnelles à l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$, voir la figure 3.4 extraite de [Ada85].

Les composantes trichromatiques se calculent de la manière suivante:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \\ Y &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \\ Z &= k \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda; \end{aligned} \tag{3.8}$$

où:

- $S(\lambda)$ est la distribution spectrale de puissance d'un signal lumineux;
- λ_{inf} et λ_{sup} sont les bornes du visible;

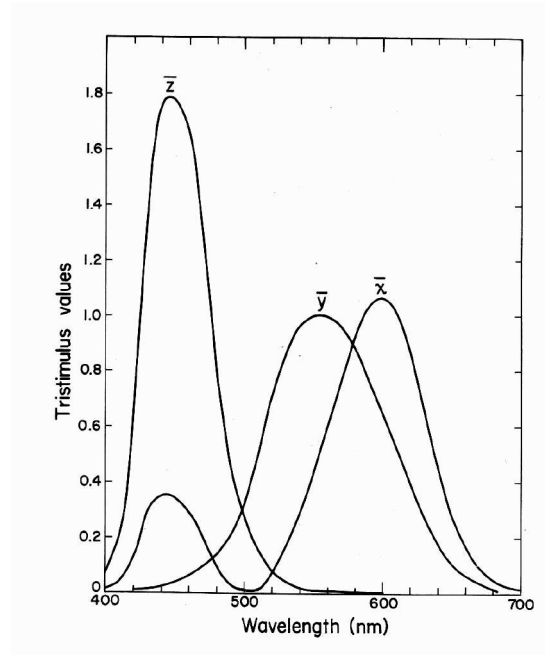


FIG. 3.4 – *Fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$*

- k est un coefficient de normalisation;

Initialement, en 1931, les fonctions colorimétriques furent définies sur un intervalle de 400 à 700 nm, avec des valeurs tous les 5 nm. Puis, elles furent étendues au début des années 70, à un domaine du visible allant de 360 à 830 nm, avec des valeurs échelonnées tous les 1 nm.

Quand les valeurs de la distribution spectrale de puissance sont exprimées en Watts, en prenant pour k une valeur de 683 lum/W , la composante Y calculée correspond alors à une luminance lumineuse (exprimée en lumens). Autrement, on peut fixer une valeur de 100 pour la luminance de la source utilisée lors des calculs colorimétriques. Un diffuseur parfait a donc lui aussi une valeur de luminance égale à 100, et toute autre surface interagissant avec la source (par réflexion ou transmission) se verra attribuer une luminance comprise entre 0 et 100. Le coefficient k , dans ce type de calcul, est déterminé de la façon suivante:

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S_s(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

où S_s est la distribution spectrale de puissance de la source.

Notons enfin que, comme dans le système RGB, le neutre d'égale énergie se voit attribuer de coordonnées trichromatiques égales à $\frac{1}{3}$.

3.2.5.4 Le diagramme de chromaticité x,y

Tout comme une carte permet de se repérer facilement, en colorimétrie on préfère souvent travailler dans le plan, plutôt que dans l'espace tout entier. On utilise pour cela les coordonnées trichromatiques, définies comme suit, dans l'espace XYZ:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Comme $x + y + z = 1$, l'une des variables est liée. Il suffit donc de spécifier x et y (z s'obtenant par $1 - y - z$). En représentant, dans le plan, les coordonnées x en abscisse et y en ordonnée, on produit une représentation graphique nommée *diagramme de chromaticité*⁴.

Quitte à penser en trois dimension, on préférera donc souvent travailler avec les coordonnées x , y et Y . Remarquons toutefois qu'une erreur commune est de croire que l'on a ainsi séparé la luminance des chromaticités, alors qu'il n'en est rien. Par définition, les coordonnées x et y dépendent de Y . *Les trois axes ne sont pas décorrélés*. Le passage inverse de xyY vers XYZ se fait de la manière suivante:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{y}Y \\ Y &= Y \\ Z &= \frac{1-x-y}{y}Y \end{aligned} \tag{3.9}$$

Le lieu des rayonnements monochromatiques, dans le diagramme de chromaticité, est une courbe convexe. La droite reliant les deux extrémités de cette courbe est la droite des pourpres (mélange de bleu et de rouge). La surface ainsi définie (nommée *locus* dans l'ensemble de la littérature anglo-saxonne) contient l'ensemble des couleurs réalisables. Notons que les coordonnées des primaires sont respectivement pour X: (1,0), Y: (0,1) et Z: (0,0). Ces points étant en dehors de la surface, cela montre bien que ces primaires sont théoriques.

La figure 3.5 extraite de [Tre93], donne la répartition spatiale des chromaticités des différentes couleurs, avec pour notations:

- R - Rouge;
- B - Bleu;
- V - Vert;
- J - Jaune;
- O - Orange;

4. Ce diagramme est, en fait, la projection de l'espace XYZ sur le plan $X+Y+Z=1$

celle-ci intersecte le lieu des rayonnements monochromatiques en D. Comme le point C se situe sur le segment $[N,D]$, on peut donc dire que la couleur lui correspondant peut s'obtenir par un mélange additif (en proportions adéquates), du neutre N et du rayonnement monochromatique D. La longueur d'onde λ_D de ce rayonnement est la *longueur d'onde dominante*. Le rapport $\frac{NC}{ND}$ est la *pureté d'excitation*. Si on prolonge le segment dans le sens opposé (de C vers N), on intersecte le lieu des rayonnements monochromatiques en Dc. A nouveau, la couleur C peut s'obtenir comme mélange additif du neutre N moins le rayonnement chromatique Dc⁵. La longueur d'onde de ce rayonnement est la *longueur d'onde complémentaire*. Dans le cas où D (D' sur la figure) se trouve être sur la ligne des pourpres, seul Dc a un sens. (voir la figure 3.6 extraite de [Hun91]).

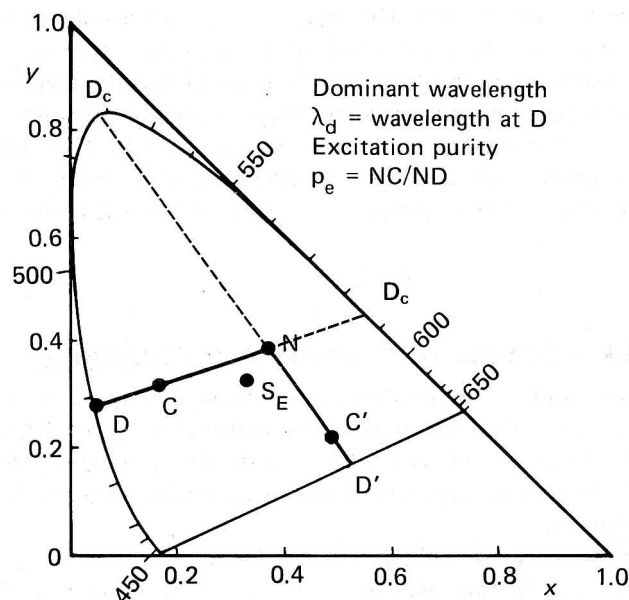


FIG. 3.6 – Longueur d'onde dominante et pureté d'excitation

Notons que la notion de longueur d'onde dominante est évidemment liée à celle de teinte, et la pureté d'excitation à celle de saturation. Toutefois, on ne peut parler au plus que de corrélations entre ces notions. En effet, les lieux de teinte constante dans le diagramme x,y ne sont pas des droites. De même, les lieux de saturation constante ne sont pas des cercles concentriques répartis autour du neutre choisi. Nous reviendrons sur ce problème plus loin.

5. Moins au sens des équivalences visuelles, vue précédemment, c'est à dire, en reportant le rayonnement monochromatique du côté de C.

3.2.5.5 Système colorimétrique supplémentaire, CIE 1964

Les conditions d'emploi du système CIE 1931 concernent un champ d'égalisation visuel de 2 degrés. Si les résultats semblent extensibles jusque vers 4 degrés, au delà, le système n'est plus satisfaisant. D'autres mesures furent donc entreprises, par Stiles et Burch, d'une part, et Speranskya, d'autre part, pour des champs visuels élargis à 10 degrés. Les données, obtenues en 1959, aboutirent à la définition d'un nouveau système CIE en 1964.

Stiles et Burch utilisèrent un colorimètre visuel NCR, avec un champ circulaire de dix degrés, séparé en deux par un diamètre horizontal, entouré d'un anneau de 2 degrés supplémentaire, les observateurs faisant abstraction de la partie centrale dans un champ de 4 degrés. Diverses primaires monochromatiques furent employées, selon les phases du travail. Par calcul, le choix unique de primaires était: 444,4 , 526,3 et 645,2 nm. Ces mesures concernèrent 49 observateurs.

Speranskya utilisa pour ses mesures un champ circulaire de 10 degrés, séparé en deux par un diamètre horizontal, entouré par un fond sombre. Les primaires étaient non monochromatiques, de longueur d'onde dominante: 465, 545 et 640 nm. Les mesures furent effectuées sur une population de 27 observateurs.

Judd effectua la synthèse de ces travaux, en définissant des fonctions colorimétriques $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$, $\bar{b}_{10}(\lambda)$ ainsi que $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $\bar{z}_{10}(\lambda)$, associées aux nouveaux systèmes R_{10} , G_{10} , B_{10} et X_{10} , Y_{10} , Z_{10} (voir la figure 3.7 extraite de [WS82]).

Notons que la fonction $\bar{y}_{10}(\lambda)$ est différente de $V(\lambda)$, celle-ci ayant été obtenue par des mesure énergétiques directes, avec une méthode d'égalisation par minimum de papillotement. La composante Y_{10} n'est donc pas une valeur lumineuse, strictement parlant, au sens de la normalisation actuelle.

Enfin, le neutre d'égale énergie se voit encore une fois attribué des coordonnées trichromatiques égales à $\frac{1}{3}$.

3.2.5.6 Validité de la colorimétrie

La colorimétrie est basée sur les hypothèses suivantes:

1. réflexivité: $[A] \equiv [A]$;
2. symétrie: si $[A] \equiv [B]$ alors $[B] \equiv [A]$;
3. transitivité: si $[A] \equiv [B]$ et $[B] \equiv [C]$ alors $[A] \equiv [C]$;
4. additivité: si $[A] \equiv [B]$ et $[E] \equiv [C]$ alors $[A] + [E] = [B] + [C]$;
5. dilatation: si $[A] \equiv [B]$ alors $k[A] \equiv k[B]$ avec $k > 0$.

Les lois de Grassmann, très souvent évoquées sous des formes assez diverses, expriment d'une part le principe de trivariance visuelle, et d'autre part, les hypothèses d'additivité et de dilatation.

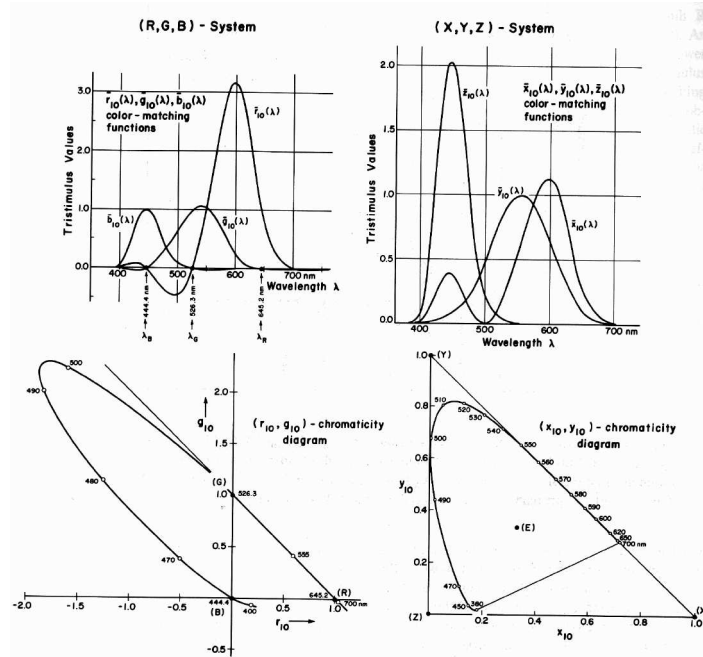


FIG. 3.7 – Le système supplémentaire CIE 1964

Disons, simplement, que le principe de trivariance visuelle et l'ensemble des cinq hypothèses citées plus haut, constituent la *généralisation trichrome*. Or, cette généralisation possède un domaine de validité limité. Les propriétés d'additivité et de dilatation ne se trouvent plus vérifiées pour les faibles luminances (à la limite du mésopique) et pour les fortes luminances (près de l'éblouissement). De même, quand interviennent les phénomènes de seuils différentiels (voir paragraphe suivant), la propriété de transitivité n'est plus vérifiée non plus. En fait, on admet que les diverses hypothèses sont suffisamment exactes, dans une large part du domaine photopique, pour que la colorimétrie fondée sur ces principes soit considérée comme valide.

3.3 Colorimétrie des différences

La colorimétrie de base, telle qu'elle a été définie ci-dessus, s'avère très utile en pratique. Elle fournit un système de repérage des couleurs, des outils mathématiques rendant compte des mélanges additifs et un diagramme de chromaticité. Cependant, elle est fondée sur l'évaluation de stimuli visuels, et demeure très proche d'une conception physique de la couleur. Très tôt est apparu le désir de mesurer des grandeurs psychophysiques, en relation avec les perceptions et sensations. Ce problème a été abordé par le biais d'expériences d'évaluation de seuils.

3.3.1 Expérience d'évaluation de seuils

Au cours de ces expériences, on demande à un observateur s'il perçoit ou non une différence entre le stimulus observé et le stimulus de référence. Dans le cas où le stimulus de référence correspond à une absence de lumière, on parle de *seuil absolu* de perception. Sinon, on parle de *seuil différentiel*. Bien entendu, ces seuils dépendent très fortement des conditions d'observation.

La détermination de seuils différentiels peut porter sur de nombreuses grandeurs perceptives. On peut ainsi évaluer des seuils de luminance, de discrimination des longueurs d'onde, de saturation, de chromaticité, etc.

Par exemple, les expériences portant sur les seuils différentiels en longueur d'onde, permettent de conclure que l'on peut distinguer environ 150 lumières monochromatiques.

3.3.2 Seuils différentiels de chromaticités

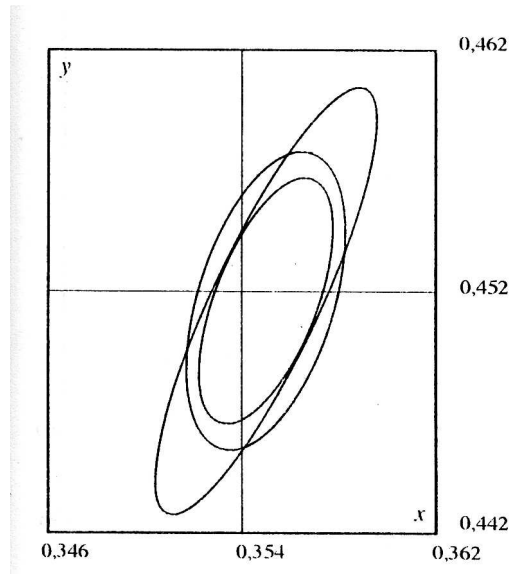
En partant du constat que le diagramme de chromaticité x,y 1931 n'est pas uniforme, autrement dit, que le seuil différentiel de chromaticité varie en fonction des coordonnées du centre d'évaluation, de très nombreux travaux ont porté sur l'évaluation de cette non-uniformité.

Malheureusement, on a pu constater une grande variabilité dans les résultats collectés. Cela est dû aux procédures d'expérimentations, différentes selon chaque auteur. Ainsi, le type de vision (monoculaire ou binoculaire), la taille du champ visuel, le niveau de luminance, le nombre de mesures par couleur, et le nombre de couleurs ont largement influencés les résultats.

Les travaux les plus connus en la matière sont ceux que Mac Adam mena en 1942. Ils concernaient 25 centres de couleurs, pour lesquels l'observateur PGN détermina les seuils différentiels à luminance constante. L'observation se faisait sur des couleurs d'ouvertures. Mac Adam supposa que les seuils différentiels, autour d'un centre de couleur, étaient donnés par une forme quadratique des coordonnées, et se traduisaient donc graphiquement par une ellipse centrée sur le point de couleur. En fait, cette forme elliptique n'a jamais réellement été démontrée. Ainsi, les seuils différentiels de chromaticités obtenus par Parra s'écartent assez largement des ellipses traditionnelles. Toutefois, d'après Sève dans [Sev96], ses résultats ont été jugés dénués de valeur et dus à des artéfacts.

Notons, aussi, que la détermination de ces seuils différentiels de chromaticité, en restant dans le cadre de formes quadratiques, est réellement difficile à mener à bien. La figure 3.8, extraite de [Sev96], montre les résultats obtenus par un même observateur, dans les mêmes conditions mais à des périodes différentes, pour le centre de couleur de coordonnées $x=0,3545$ et $y=0,4518$. Ce fait peut donc, lui aussi, expliquer la grande disparité des résultats obtenus lors des différentes expériences.

La figure 3.9, extraite de [Ada85], montre les seuils de chromaticité obtenus par Mac Adam en 1942.

FIG. 3.8 – *Reproductibilité de la détermination des seuils différentiels de chromaticité*

L'équation cartésienne d'une ellipse peut s'écrire:

$$g_{11}(x - x_0)^2 + 2g_{12}(x - x_0)(y - y_0) + g_{22}(y - y_0)^2 = ds^2$$

où, (x_0, y_0) sont les coordonnées du centre de l'ellipse. Dans notre cas, on prendra $ds = 1$. Les coefficients g_{11} , g_{12} et g_{22} sont les paramètres de l'ellipse. Pour chaque centre de couleur, leurs valeurs déterminent entièrement l'ellipse correspondante⁶. En dehors des points de couleur déterminés directement, il est nécessaire d'interpoler pour déterminer les paramètres d'ellipses relatives à d'autres centres de couleur. Mac Adam, en 1943, a publié des graphiques permettant une interpolation commode afin de déterminer les coefficients g_{11} , $2g_{12}$ et g_{22} . La précision des valeurs obtenues est de l'ordre de 15 %. La figure 3.10, extraite de [Ada85], montre ces trois graphiques. Notons que les valeurs des coefficients doivent être multipliées par un facteur 10^{-4} .

3.3.3 Diagrammes de chromaticité uniforme

De nombreux travaux, là encore, ont porté sur l'obtention d'un diagramme uniforme, où les seuils différentiels correspondraient à des cercles.

6. Dans le cas où, $g_{11} = g_{22}$, et $g_{12} = 0$, on retrouve l'équation d'un cercle.

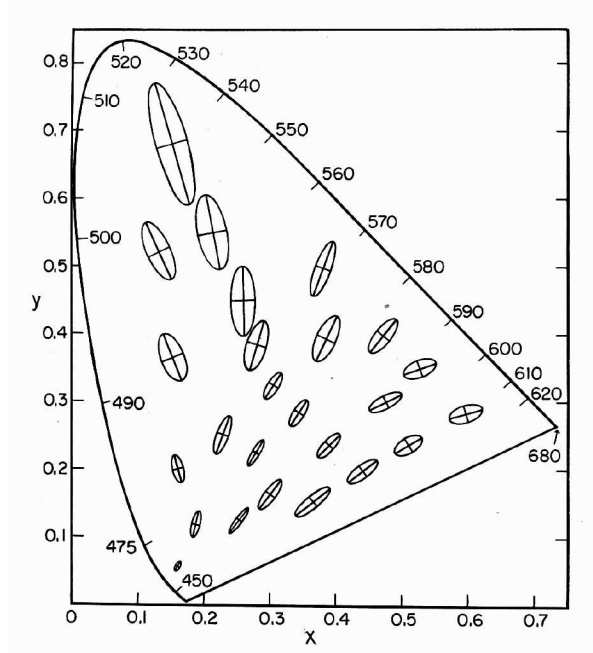


FIG. 3.9 – *Seuils différentiels de chromaticités obtenus par Mac Adam*

3.3.3.1 Solution locale

Soit une ellipse de paramètres g_{11} , g_{12} et g_{22} . Alors, dans un repère oblique où Φ , l'angle entre les axes, est tel que $\cos(\Phi) = \frac{g_{12}}{\sqrt{g_{11}g_{22}}}$, et où les nouvelles unités s'obtiennent par multiplication de coefficients: $k\sqrt{g_{11}}$ pour les abscisses, et $k\sqrt{g_{22}}$ pour les ordonnées, k étant une constante quelconque, l'ellipse d'origine est transformée en cercle.

Cette solution est bien évidemment locale, puisque pour chaque centre d'ellipse le repère oblique varie.

3.3.3.2 Solution par transformation projective

La recherche d'une solution globale se ramène, pour l'essentiel, à l'utilisation de transformations projectives sur un plan. Soient x' et y' les coordonnées du nouveau diagramme de chromaticité obtenu par une telle transformation, à partir du diagramme x, y de la CIE. On a :

$$\begin{aligned} x' &= \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + c_3} \\ y' &= \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + c_3} \end{aligned}$$

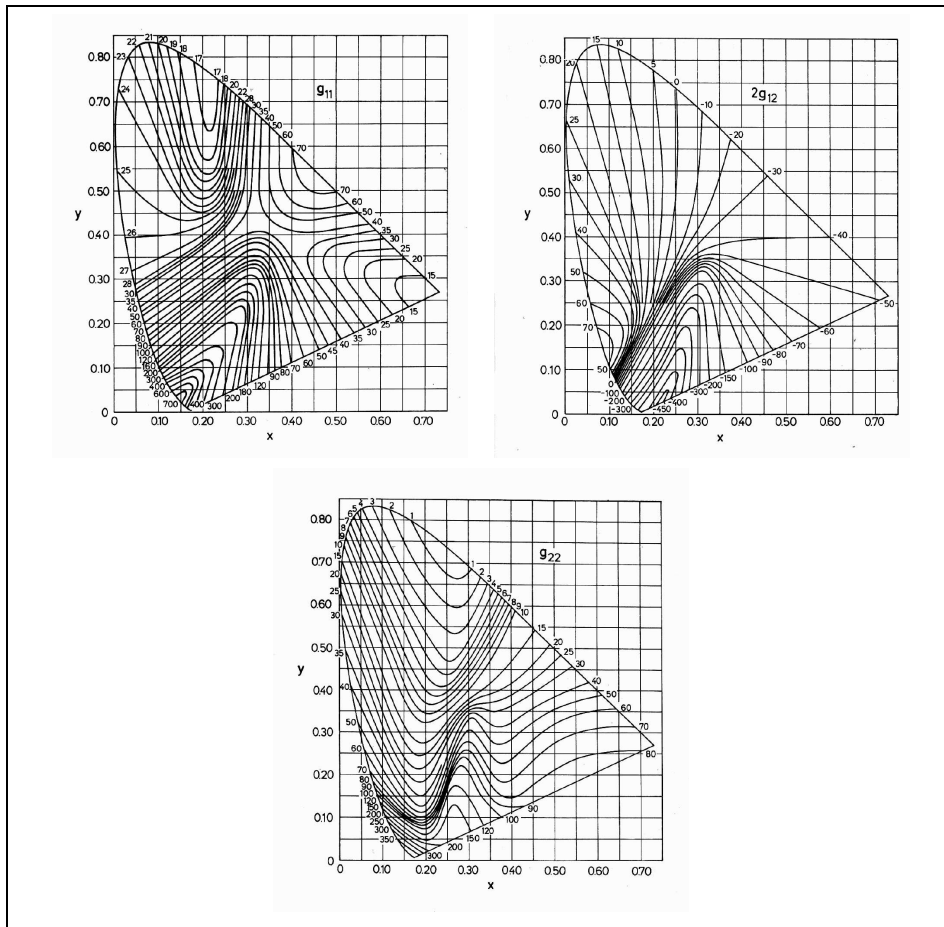


FIG. 3.10 – Graphiques permettant de déterminer les coefficients g_{11} , $2g_{12}$ et g_{22}

En choisissant des valeurs adéquates pour les divers coefficients, on espère ainsi transformer l'ensemble des ellipses du diagramme xy en cercles. Mais, cette méthode ne permet de donner que des solutions approchées. La raison en sera donnée dans le paragraphe suivant.

Pour mémoire, on peut citer quelques exemples de diagrammes obtenus par transformation projective:

- Diagramme de Judd (connu sous le nom de diagramme UCS, Uniform Chromaticity Scale);
- Diagramme uv de Mac Adam;
- Diagramme de Breckenridge et Schaub (ou Rectangular UCS);
- Diagramme $\alpha\beta$ de Hunter.

3.3.3.3 Solution théorique

De la même façon qu'une mappemonde ne peut rendre compte du globe terrestre en respectant uniformément les distances (quelle que soit la transformation utilisée), l'obtention d'un diagramme uniforme de chromaticité est impossible. Il faut en fait reconstruire la surface gauche correspondant, par analogie, au globe terrestre.

Les figures 3.11, 3.12 et 3.13, extraites de [Ada85], montrent une tentative menée en ce sens par Mac Adam en 1944. Il a, pour cela, subdivisé le diagramme xy de la CIE en petits rectangles. Puis, chaque rectangle a été transformé en quadrilatère, par transformée oblique, en utilisant les paramètres g_{11} , g_{12} et g_{22} de l'ellipse dont le centre est celui du rectangle. Enfin, les quadrilatères ont été recollés et ajustés aussi précisément que possible, afin d'obtenir la surface gauche montrée sur la figure 3.13.

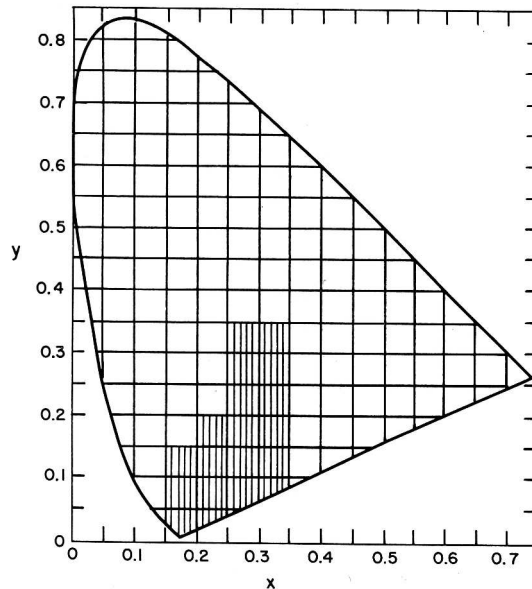


FIG. 3.11 – *Découpage en carreaux du diagramme xy*

La notion de distance chromatique entre deux points se confond alors avec celle de la longueur de la ligne géodésique joignant ces points⁷. La métrique ainsi définie est une métrique Riemannienne.

Notons, de plus, que sur cette surface, on peut suivre les lignes d'égale teinte, ou d'égale saturation autour d'un neutre.

Pour plus d'informations sur cette approche théorique, le lecteur pourra consulter [Tre93] (annexes), [WS82] (chapitre: Line Elements of Color Space), ou plus récemment

7. Une ligne géodésique correspond à la courbe sur la surface joignant deux points au moyen de la plus courte distance.

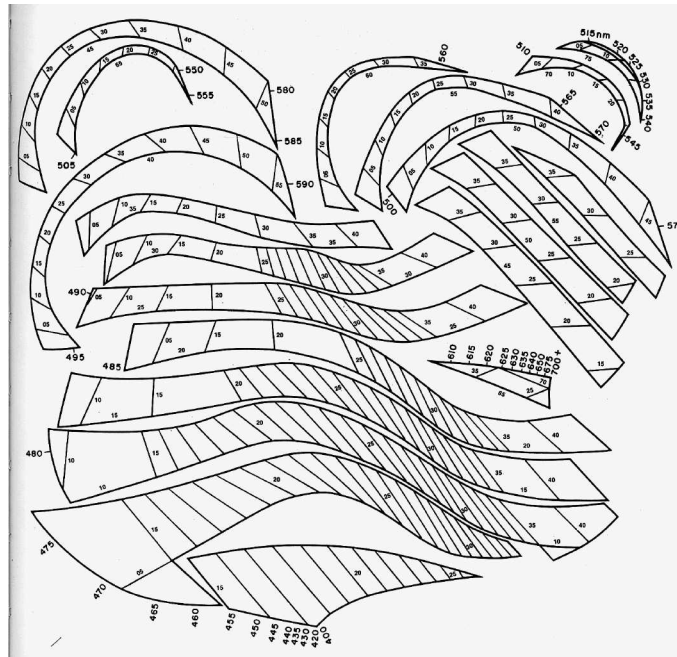


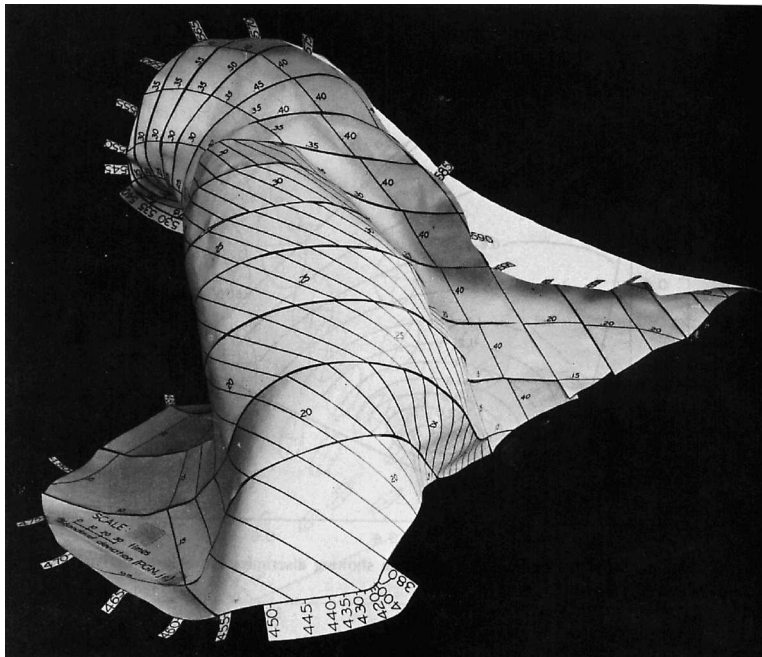
FIG. 3.12 – Mise à échelle perceptuelle des carreaux

[SW97].

3.3.4 Espaces de couleurs uniformes

Tout ce qui vient d'être écrit précédemment est relatif à une situation à deux variables. Il serait important de prendre en compte la luminance. On pense, en général, que pour les couleurs d'ouverture, la luminance ne joue pas un rôle déterminant si l'on reste dans le domaine photopique. En pratique, on a plutôt à traiter des couleurs de surface. Or, les résultats expérimentaux relatifs aux couleurs d'ouverture ne peuvent s'appliquer tels quels. En particulier, on estime que les ellipses de seuils de chromaticité doivent être plus grandes quand les couleurs de surface s'assombrissent, en accord avec une discrimination chromatique très faible pour les noirs.

Si l'on poursuit la même démarche que celle décrite précédemment, au lieu d'ellipses, il faut maintenant considérer des ellipsoïdes d'égalisation visuelle. En théorie, on devrait donc utiliser une formulation comportant six termes (trois termes carrés et trois termes croisés). Cependant, Brown et Mac Adam ayant fait l'hypothèse que les seuils de luminance sont indépendants des seuils de chromaticité, proposent de ne rajouter qu'un terme, de type: $g_{33}(\frac{\Delta Y}{Y})^2$. Cela revient à considérer que deux axes de l'ellipsoïde sont dans un plan de luminance constante. Notons que le domaine de validité de cette hypothèse est certainement restreint aux couleurs de surface plutôt claires, conformé-

FIG. 3.13 – La surface gauche x,y dans l'espace

ment à la remarque concernant l'agrandissement des ellipses de seuils de chromaticités pour les couleurs sombres.

L'espace couleur XYZ (1931) de la CIE, tout comme son diagramme de chromaticité xy , est non uniforme au sens d'une distance perceptuelle. De la même manière qu'au paragraphe précédent, la solution théorique consiste à plonger le volume⁸ contenant l'ensemble des couleurs réalisables, dans un espace de dimension supérieure à trois. Considérant que l'espace couleur XYZ, de dimension $n=3$, est de type Riemannien, il faut alors un espace euclidien de dimension $m = \frac{n(n+1)}{2} = 6$ pour le contenir. Muni de cette transformation, on peut à nouveau utiliser une géométrie euclidienne, où la notion de distance rejoint celle de géodésique. Toute autre solution d'uniformisation, où l'on demeure en dimension 3, ne peut être qu'approchée.

Historiquement, de nombreux travaux ont porté sur ce dernier type de solution. On peut citer, par exemple:

- L'espace Lab de Hunter;
- L'espace $U^*V^*W^*$ CIE 1964.

8. Volume au sens où l'ensemble des chromaticités est contenu à l'intérieur d'une surface fermée, et que le domaine des luminances peut raisonnablement être considéré, dans le cas de la vision humaine, comme borné entre 10^{-6} cd/m² (seuil absolu) et 10^8 cd/m² (éblouissement).

Devant le foisonnement de recherches en ce domaine, ce n'est qu'en 1976 que la CIE y a mis bon ordre, en proposant deux espaces "uniformes":

- L'espace $L^*u^*v^*$ CIE 1976 (ou CIELUV);
- L'espace $L^*a^*b^*$ CIE 1976 (ou CIELAB);

Ces espaces sont désormais utilisés de manière standard.

3.3.4.1 Espace $L^*u^*v^*$ CIE 1976

Le passage de coordonnées XYZ vers des coordonnées $L^*u^*v^*$ se fait en utilisant les formules suivantes:

$$\begin{aligned} L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ u^* &= 13L^* (u' - u_n) \\ v^* &= 13L^* (v' - v'_n) \end{aligned} \quad (3.10)$$

où les quantités u' , v' , u'_n et v'_n sont calculées comme suit:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \\ u'_n &= \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \\ v'_n &= \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} \end{aligned}$$

Les valeurs trichromatiques X_n , Y_n et Z_n sont les valeurs d'un blanc de référence. On utilise usuellement pour cela: A, C ou D65. L'introduction de ces valeurs est une façon de prendre en compte le phénomène d'adaptation chromatique. Nous reviendrons au chapitre 5 sur cette notion.

Les valeurs de u'_n et v'_n sont indiquées pour les trois sources citées plus haut, dans le tableau 3.1.

	u'_n	v'_n
A	0,255970	0,524293
C	0,200890	0,460889
D65	0,197832	0,468340

TAB. 3.1 – Valeurs utiles aux calcul de u^* et v^*

La coordonnée L^* est une clarté, c'est à dire une luminosité relative appliquée à une couleur de surface. Dans le cas d'un diffuseur parfaitement réfléchissant, on $Y = Y_n$ (la luminance lumineuse de la source), et donc $L^* = 100$.

Quand, le rapport $\frac{Y}{Y_n}$ devient inférieur à 0,008856, Pauli a proposé d'effectuer une correction dans le calcul de L^* , soit:

$$L^* = 903.3 \frac{Y}{Y_n} \quad (3.11)$$

Notons enfin que lorsque l'on travaille sur des champs visuels supérieurs à 2 degrés, on peut utiliser les mêmes formules à partir des coordonnées X_{10} , Y_{10} et Z_{10} du système supplémentaire CIE 1964.

3.3.4.2 Espace $L^*a^*b^*$ CIE 1976

Le passage de coordonnées XYZ vers des coordonnées $L^*a^*b^*$ se fait en utilisant les formules suivantes:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \left(f_x \left(\frac{X}{X_n} \right) - f_y \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \right) \\ b^* &= 200 \left(f_y \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f_z \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

L^* est une clarté, définie de la même façon que pour l'espace $L^*u^*v^*$ CIE 1976. On peut aussi lui appliquer la correction de Pauli.

Pour le calcul des coordonnées a^* et b^* , on a:

$$\begin{aligned} f_x \left(\frac{X}{X_n} \right) &= \left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } \frac{X}{X_n} > 0,008856 \\ f_x \left(\frac{X}{X_n} \right) &= 7,787 \left(\frac{X}{X_n} \right) + \frac{16}{116} \quad \text{si } \frac{X}{X_n} \leq 0,008856 \\ f_y \left(\frac{Y}{Y_n} \right) &= \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \\ f_y \left(\frac{Y}{Y_n} \right) &= 7,787 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) + \frac{16}{116} \quad \text{si } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \\ f_z \left(\frac{Z}{Z_n} \right) &= \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } \frac{Z}{Z_n} > 0,008856 \\ f_x \left(\frac{Z}{Z_n} \right) &= 7,787 \left(\frac{Z}{Z_n} \right) + \frac{16}{116} \quad \text{si } \frac{Z}{Z_n} \leq 0,008856 \end{aligned} \quad (3.13)$$

A nouveau, les valeurs trichromatiques X_n , Y_n et Z_n sont celles d'un blanc de référence. Le tableau 3.2 donne, pour les sources A, C et D65, les valeurs leur correspondant.

	X_n	Y_n	Z_n
A	109,85	100	35,58
C	98,07	100	118,23
D65	95,04	100	108,88

TAB. 3.2 – Valeurs utiles au calcul des coordonnées $L^*a^*b^*$

3.3.4.3 Propriétés de ces espaces

Les deux espaces CIELUV et CIELAB sont adaptés à la représentation des couleurs de surface. Leur axe des clartés est confondu avec l'axe neutre. Les plans définis par les axes u^*v^* et a^*b^* sont des plans de luminance constante.

Les valeurs u' et v' définies dans les formules de passage de XYZ vers $L^*u^*v^*$, permettent d'obtenir un diagramme de chromaticité. Les droites définies dans le diagramme xy sont transformées en droites dans le diagramme $u'v'$. Cette propriété permet de rendre compte facilement des mélanges additifs. Le rapport de la valeur maximum du grand axe des ellipses de différence à la valeur minimum du petit axe, dans le diagramme xy, est environ de 30. Dans le diagramme $u'v'$, il est ramené à 8,7. Cela montre bien l'amélioration, en terme d'uniformisation, qu'apporte cet espace.

Les axes a^* et b^* ont une orientation intéressante, car approximativement comparable à celle des teintes élémentaires:

- vert pour $a^* < 0$ et $b^* = 0$, rouge pour $a^* > 0$ et $b^* = 0$;
- bleu pour $a^* = 0$ et $b^* < 0$, jaune pour $a^* = 0$ et $b^* > 0$.

En revanche l'espace CIELAB n'a pas à proprement parlé de diagramme de chromaticité. Les formules de passages de XYZ vers $L^*a^*b^*$ étant non linéaires, on ne peut définir de diagramme à l'aide de primaires. Sève dans [Sev96] propose de calculer des grandeurs \tilde{a} et \tilde{b} , ne dépendant pas de la luminance et se prêtant bien à une représentation dans le plan. Notons aussi que les droites du diagramme xy sont transformées en courbes dans les plans de luminance constante de l'espace CIELAB.

Dans les deux espaces CIELUV et CIELAB, on peut passer en coordonnées semi-polaires, et calculer des grandeurs corrélées à celles de chroma, saturation et teinte.

Le chroma se calcule ainsi:

$$C_{uv}^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \quad C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.14)$$

Dans l'espace CIELUV, on peut définir une notion de saturation (ce qui est impossible dans l'espace CIELAB, étant donné l'absence de diagramme de chromaticité), par: $s_{uv}^* = \frac{C_{uv}^*}{L^*}$, ou encore:

$$s_{uv}^* = 13 \sqrt{(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2} \quad (3.15)$$

Enfin, on peut calculer un angle de teinte, moyennant les relations:

$$h_{uv}^* = \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) \quad h_{ab}^* = \arctan\left(\frac{a^*}{b^*}\right) \quad (3.16)$$

Notons que la fonction \arctan varie entre -90° et $+90^\circ$ degrés, alors que l'angle de teinte doit prendre des valeurs entre 0 et 360 degrés. Pour cela, il suffit de suivre la convention suivante :

- $0^\circ < h_{uv} < 90^\circ$ si $u^* > 0, v^* > 0$;
- $90^\circ < h_{uv} < 180^\circ$ si $u^* < 0, v^* > 0$;
- $180^\circ < h_{uv} < 270^\circ$ si $u^* < 0, v^* < 0$;
- $270^\circ < h_{uv} < 360^\circ$ si $u^* > 0, v^* < 0$;

et de même en utilisant a^* et b^* .

3.3.5 Formules de différences de couleurs

Afin d'apprécier une différence de couleur, il faut pouvoir isoler des autres classes d'apparence. Aussi, on choisira pour deux objets à comparer, des conditions d'observations aussi proches que possible (même taille, même état de surface, etc.). Evaluer une différence de couleur entre, par exemple, un tissu et une surface peinte n'a pas de sens.

De plus, les jugements visuels peuvent varier d'une personne à l'autre. Par des méthodes statistiques, il faut donc dégager la notion de *perceptibilité*.

Notons aussi que la comparaison de différences assez faibles a un sens. On peut, par exemple estimer que deux rouges sont aussi différents que deux neutres. Mais, pour des valeurs plus grandes, la situation est bien plus complexe. Ainsi, il est difficile de répondre à la question: "Quelle doit être la couleur grise qui présentera avec un blanc la même différence que celle existant entre tel rouge et tel vert?".

Dans l'industrie, on travaille beaucoup avec la notion *d'acceptabilité*. Celle-ci est définie de manière assez floue, et peut varier d'une activité à l'autre. Si dans l'industrie textile on peut se montrer tolérant, ce n'est pas le cas pour des peintures de voiture. Le coût économique rentre, lui aussi, bien sûr, en ligne de compte quant à l'acceptabilité des produits.

De très nombreuses formules de différence couleur ont vu le jour au cours de ce demi-siècle. On peut citer ainsi:

- La formule Judd-Hunter (ou NBS), fondée sur l'emploi du diagramme de Hunter, et une définition de la clarté;
- La formule ANLAB;
- Les formules FMC1 et FMC2;

- La formule CMC;
- La formule Munsell-Nickerson;
- La formule CIE 94 (voir [MS95]).

3.3.5.1 Méthode liée aux ellipsoïdes d'égalisation visuelle

Le calcul des éléments différentiels généralisé à trois dimensions permet d'écrire:

$$ds = \sqrt{g_{11}(x - x_0)^2 + 2g_{12}(x - x_0)(y - y_0) + g_{22}(y - y_0)^2 + g_{33}\left(\frac{Y - Y_0}{Y}\right)^2} \quad (3.17)$$

ds est alors une différence couleur entre les couleurs de coordonnées x, y, Y et x_0, y_0, Y_0 évaluée avec le seuil différentiel comme unité. La valeur de ds s'exprime en unités Mac Adam.

3.3.5.2 Méthodes liées aux espaces uniformes CIELUV et CIELAB

Dans ces espaces, on utilise une distance euclidienne, soit:

$$\begin{aligned} \Delta E_{uv}^* &= \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \\ \Delta E_{ab}^* &= \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

où, pour deux couleurs de coordonnées $L_1^* u_1^* v_1^*$ (respectivement $L_1^* a_1^* b_1^*$) et $L_2^* u_2^* v_2^*$ (respectivement $L_2^* a_2^* b_2^*$):

$$\begin{aligned} \Delta L^* &= L_2^* - L_1^* \\ \Delta u^* &= u_2^* - u_1^* \\ \Delta v^* &= v_2^* - v_1^* \\ \Delta a^* &= a_2^* - a_1^* \\ \Delta b^* &= b_2^* - b_1^* \end{aligned}$$

En coordonnées polaires, on peut écrire pour CIELUV et CIELAB:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta H^*)^2} \quad (3.19)$$

où:

$$\begin{aligned} \Delta C^* &= C_2 - C_1 \\ \Delta H^* &= 2\sqrt{C_1^* C_2^*} \sin \frac{\Delta h}{2} \end{aligned}$$

avec $\Delta h = h_2 - h_1$.

3.3.5.3 Comparaison numérique des formules de distances Luv et Lab

La notion importante à souligner ici est celle de l'écart juste perceptible (just noticeable difference, ou jnd). Celui-ci est deux à trois fois l'écart-type de détermination des seuils différentiels. Il est perçu par définition dans 95% des cas. Arbitrairement, on peut dire que des différences couleurs sont petites entre 0 et 5 écarts jnd, moyenne entre 5 et 15, et grandes au delà.

Les espaces CIELUV et CIELAB, après de nombreuses comparaisons, ont été jugés de mérites équivalents. Aucun n'est plus uniforme que l'autre. Cependant, les valeurs numériques obtenues par les deux formules de différence couleur sont la plupart du temps différentes (surtout pour les couleurs saturées).

On considèrera pourtant qu'une unité CIELAB et une unité CIELUV correspondent environ à un écart jnd. *Le seuil de perceptibilité dans ces deux espaces est donc de 1.* Le seuil d'acceptabilité peut, lui, prendre des valeurs de 3, 4 ou 5 selon les diverses sources issues de la littérature.

Notons, enfin, que des travaux concernant la mise au point d'espaces couleurs uniformes prenant en compte un nombre plus important de paramètres pertinents de l'apparence couleur ont toujours cours. L'espace LLab est de ceux-ci. Il sera décrit en détail au chapitre 6, car la notion de distance entre images que nous proposons, s'appuie sur lui.

Chapitre 4

Mise en oeuvre de calculs spectraux

4.1 Le problème posé

Les méthodes de rendu utilisées en synthèse d'images, s'appuient de plus en plus sur des modèles physiquement plausibles, dont la complexité ne cesse de croître. Pourtant ces mêmes méthodes ne gèrent, la plupart du temps, la couleur que de manière assez succincte. Confondant le codage en coordonnées RGB de la mémoire vidéo des stations graphiques utilisées¹ avec un espace couleur RVB défini comme au chapitre précédent, à partir d'un observateur moyen, les calculs colorimétriques se font directement sur ces coordonnées. Cela permet ainsi de fabriquer des images numériques, directement visualisables sur un moniteur couleur. Le principal avantage de cette méthode est donc d'effectuer des calculs "colorimétriques" rapides, et de fournir des images plausibles (tout du moins dans le domaine photopique). En revanche, les inconvénients sont nombreux. En occultant l'aspect spectral de la lumière, on s'interdit de modéliser correctement les émissions des sources (notamment les sources avec raies). De même, les interactions entre les matériaux (en réflexion ou transmission) ne sont prises en compte que de manière approximative. Il est impossible de modéliser les diffractions. On ne peut, par exemple, calculer la dispersion d'un faisceau de lumière blanche au travers d'un prisme. Il est assez difficile d'obtenir une certaine fidélité couleur vers des médias différents (un autre moniteur, ou bien une imprimante). Il est aussi impossible de gérer correctement les dynamiques en luminance et chrominance. Si les coordonnées calculées dépassent les bornes autorisées, la solution consistant à ramener les coordonnées fautives au niveau des bornes n'est pas satisfaisante.

Pour toutes ces raisons, l'emploi de modèles de rendu spectraux s'impose. Dans ce type de solution, il s'agit d'attacher à chaque source de lumière une Distribution Spectrale de Puissance, notée $S_s(\lambda)$. En ce qui concerne les matériaux, comme nous

1. Ces coordonnées RGB, entières, sont comprises entre 0 et 255, d'où le mythe des 16 millions de couleurs.

l'avons vu au chapitre 2, leur comportement spectral peut être lié à l'aspect spatial, de par les angles d'incidence et de réflexion (ou réfraction). Moyennant la valeur de ces angles, on supposera que cela détermine la fonction de réflectance²(ou de transmittance) désirée. Notons $f_{\theta_i, \theta_r}(\lambda)$ cette fonction.

Les opérations qu'il faut savoir mener à bien, lors d'un calcul de rendu spectral, sont les suivantes:

1. En considérant un spectre incident $S_i(\lambda)$ (non nécessairement égal à $S_s(\lambda)$), et une fonction d'interaction $f_{\theta_i, \theta_r}(\lambda)$, le spectre résultant $S_r(\lambda)$ est :

$$S_r(\lambda) = f_{\theta_i, \theta_r}(\lambda) S_i(\lambda)$$

Il faut donc savoir effectuer le produit des deux fonctions;

2. Comme la lumière parvenant en un point peut provenir directement de la source, mais aussi du restant de la scène (par inter-réflexions, ou inter-transmissions), le spectre résultant en un point est la somme de toutes les puissances spectrales lui parvenant. La deuxième opération est donc la sommation de fonctions;
3. Afin de produire une image couleur indépendante de l'outil de visualisation, il faut calculer dans le plan image (après projection), pour chaque pixel, les composantes trichromatiques X_{pix} , Y_{pix} et Z_{pix} de la puissance spectrale $S_{pix}(\lambda)$ lui correspondant, soit:

$$\begin{aligned} X_{pix} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S_{pix}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y_{pix} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S_{pix}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z_{pix} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S_{pix}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4.1)$$

Ainsi, la dernière opération consiste à effectuer des intégrations pondérées de fonctions.

Aucun des algorithmes présentés par la suite n'ayant été implémenté dans un logiciel de rendu, nous nous concentrerons sur l'étude des calculs spectraux, en dehors de toute autre considération. Ainsi, pour les interactions lumière-matière, nous nous restreindrons au cas des réflexions normales (sans tenir compte d'éventuels angles d'incidence ou de réflexion). De même, nous n'étudierons que les opérations de produits spectre-réflectance, et les opérations d'intégrations pondérées³.

2. Le cas des photoluminescences est lié à celui des réflexions, dès lors que l'on envisage des fonctions de réflectance pouvant prendre des valeurs supérieures à 1.

3. Nous reviendrons à plus de généralité en fin de chapitre, lorsque nous nous intéresserons à l'implémentation possible de l'algorithme adaptatif dans un logiciel de rendu.

L'intérêt est donc, dans notre cas, de savoir effectuer des produits : $S_r(\lambda) = R(\lambda)S_i(\lambda)$, et de passer de $S_r(\lambda)$ à des composantes trichromatiques X , Y et Z .

La valeur du coefficient de normalisation K utilisée est la suivante:

$$K = \frac{1}{\int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4.2)$$

Les valeurs de luminance Y calculées sont donc comprises entre 0 et 1. On considérera que ce coefficient est calculé une fois pour toutes, pour chacune des sources utilisées lors des tests.

Le domaine du visible est fixé, pour le reste de ce chapitre à: $\lambda_{inf} = 380nm$ et $\lambda_{sup} = 700nm$.

La manière la plus simple d'effectuer informatiquement les deux opérations décrites plus haut est de discrétiser le domaine du visible avec un pas constant $\delta\lambda$. Dans notre cas, on prend: $\delta\lambda = 5$ nm. Cela représente donc 64 échantillons, de $\lambda_1 = 380$ nm à $\lambda_{64} = 695$ nm. Et cela revient à considérer que les fonctions spectrales sont des fonctions en escalier, constantes sur tous les intervalles de longueur 5 nm, définies sur [380 nm, 700 nm]. Un produit spectre réflectance se ramène donc à effectuer le produit des valeurs constantes deux à deux, soit:

$$S_r(\lambda_i) = R(\lambda_i)S_i(\lambda_i) \text{ pour } 1 \leq i \leq 64 \quad (4.3)$$

Le passage de données spectrales à des composantes trichromatiques s'effectue au moyen de sommes finies⁴:

$$\begin{aligned} X &= K \sum_{i=1}^{i=64} S_r(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \\ Y &= K \sum_{i=1}^{i=64} S_r(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \\ Z &= K \sum_{i=1}^{i=64} S_r(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dans le cas où la distribution spectrale de puissance de la source comporte des raies d'émission, le passage vers des composantes XYZ est théoriquement plus compliqué. Soit par exemple λ_{raie} , la longueur d'onde d'une raie d'émission. Il faut alors rajouter au calcul précédent, par exemple pour la composante X : $S_r(\lambda_{raie})\bar{x}(\lambda_{raie})$. Or, en pratique, on répartit la puissance de la raie sur l'intervalle $[\lambda_i, \lambda_{i+1}]$ encadrant λ_{raie} : soit une puissance $S_r(\lambda_{raie})\delta\lambda$. Puis, en supposant une faible variation des fonctions colorimétriques sur un intervalle de longueur $\delta\lambda$, on se ramène au cas général⁵, en affectant en λ_i et λ_{i+1} les termes suivants:

- en λ_i , $(S_r(\lambda_i) + \frac{\lambda_{raie} - \lambda_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} S_r(\lambda_{raie})\delta\lambda) \bar{x}(\lambda_i)$;

4. Le coefficient K est calculé de la même façon.

5. On a vérifié pour la source fluorescente, utilisée lors des tests du paragraphe 4.3, que cette approximation correspondait à une erreur de l'ordre de 0,2 unités Luv.

- en λ_{i+1} , $(S_r(\lambda_{i+1}) + \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_{raie}}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} S_r(\lambda_{raie}) \delta\lambda) \bar{x}(\lambda_{i+1})$;

De cette façon, le cas des sources avec pics n'est pas un cas particulier. Et le passage de donnée spectrales vers des composantes XYZ se fait dans tous les cas à l'aide d'une somme de 64 termes.

Nous considérerons la méthode exposée ci-dessus comme celle fournissant les résultats de référence.

Au début de ce chapitre, nous avons évoqué les inconvénients que représentait la solution classique d'un rendu RGB. Pourtant, peu de logiciels de rendu spectral sont apparus. La principale raison est évidemment la quantité de calculs supplémentaires que requiert cette solution. Dans notre cas, on passerait de 3 coordonnées RGB, à 64 échantillons, soit des temps de rendu multipliés par un facteur supérieur à 20 !

Le problème qui nous préoccupe donc est d'obtenir une méthode de calcul spectral beaucoup plus rapide. Cette méthode devra par ailleurs fournir des composantes trichromatiques suffisamment proches des valeurs de référence, pour que perceptuellement les erreurs commises soient indiscernables.

Le problème, assez important, de la facilité d'implémentation des méthodes décrites, pour modifier un rendu classique en rendu spectral, sera partiellement évoqué.

4.2 Solutions connues

Les solutions connues peuvent être regroupées en deux grandes familles:

- celles s'appuyant sur un échantillonnage plus efficace;
- celles projetant les données spectrales sur une base de fonctions.

4.2.1 Les méthodes d'échantillonnage

4.2.1.1 Riemann

On peut utiliser, de la même façon que pour la méthode de référence, un échantillonnage uniforme, avec $m < 64$ échantillons. La pas d'intégration ainsi défini est:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}}{m + 1}$$

Les calculs à effectuer concernent dès lors les valeurs de spectre, de réflectance et de fonctions colorimétriques pour les longueurs d'onde suivantes:

$$\lambda_j = \lambda_{inf} + (j - 1)\delta\lambda \text{ avec } 1 \leq j \leq m$$

Les produits spectres-réflectances se font toujours longueur d'onde à longueur d'onde. Et le passage en composantes trichromatiques s'effectue de la manière suivante :

$$X = K \sum_{j=1}^{j=m} S_r(\lambda_j) \bar{x}(\lambda_j)$$

$$Y = K \sum_{j=1}^{j=m} S_r(\lambda_j) \bar{y}(\lambda_j)$$

$$Z = K \sum_{j=1}^{j=m} S_r(\lambda_j) \bar{z}(\lambda_j)$$

L'inconvénient principal de cette méthode est qu'elle ne permet pas, en général d'effectuer des calculs corrects dans le cas de spectres avec pics. Supposons, par exemple, qu'un spectre possède une raie d'émission, à la longueur d'onde λ_{raie} . Comme nous l'avons décrit plus haut, on se ramène, pour la méthode de référence, à une solution classique, en répartissant la puissance de la raie sur l'intervalle $[\lambda_i, \lambda_{i+1}]$ l'encadrant. Si aucun des λ_j utilisé n'est contenu dans cette intervalle, le calcul effectué sera incorrect, et ne rendra compte que du continuum du spectre. Dans le cas contraire, si un des λ_j se trouve être dans l'intervalle, cela reviendra à considérer une raie d'émission de largeur $\delta\lambda$ (le pas d'intégration) supérieure à 5 nm. Et donc, on surestimera l'importance de la puissance du pic.

4.2.1.2 Méthodes d'ordre supérieur

On peut penser aussi utiliser d'autres méthodes d'intégration, toutes de type Newton-Cotes, mais d'ordre supérieur à celle de Riemann. Ce peuvent être les méthodes de :

- trapèze;
- Simpson;
- Simpson 3/8;
- Boole;
- Weddle;

On trouvera dans [SSS92] une comparaison numérique de ces méthodes. Comme nous ne les avons pas implémentées pour nos tests, notre description s'arrêtera là. Notons, toutefois, qu'à nouveau les spectres avec pics ne peuvent être pris en compte correctement.

4.2.1.3 Gauss-Legendre dans l'espace XYZ

Cette méthode dérive d'un type d'intégration en quadrature gaussienne. Les échantillons ne sont plus placés de manière uniforme, mais de façon optimale, au sens de la minimisation de l'erreur numérique lors du passage en composantes XYZ.

Soit une fonction f , et une fonction de poids w positive, définies sur un intervalle $[a, b]$. Alors l'intégration gaussienne permet l'approximation suivante:

$$\int_a^b f(x)w(x) dx \simeq \sum_{i=0}^{i=n} H_i f(x_i) \quad (4.5)$$

Le détail des opérations permettant d'obtenir les valeurs H_i et x_i figure en annexe A

Wallis dans [Wal75] a appliqué cette méthode pour effectuer des calculs colorimétriques. Il a pour cela assimilé les fonctions de poids aux fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$. On détermine ainsi trois ensembles de couples (poids, longueur d'onde), que l'on notera:

- $(p_{\bar{x}j}, \lambda_{\bar{x}j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{x}}$;
- $(p_{\bar{y}j}, \lambda_{\bar{y}j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{y}}$;
- $(p_{\bar{z}j}, \lambda_{\bar{z}j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{z}}$;

où $m_{\bar{x}}$, $m_{\bar{y}}$ et $m_{\bar{z}}$ sont les ordres d'intégration (non nécessairement égaux). Les valeurs numériques des poids et longueurs d'onde, pour des ordres d'intégration allant de 1 à 8, figurent en annexe A.

Les spectre, réflectances et fonctions colorimétriques sont donc échantillonnés à l'aide des $\lambda_{\bar{x}j}$, $\lambda_{\bar{y}j}$ et $\lambda_{\bar{z}j}$, soit $m_{\bar{x}} + m_{\bar{y}} + m_{\bar{z}}$ échantillons.

Les produits spectre-réflectance s'effectuent longueur d'onde à longueur d'onde, et le passage à des composantes trichromatiques se fait de la façon suivante:

$$\begin{aligned} X &= K \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{x}}} p_{\bar{x}j} S_r(\lambda_{\bar{x}j}) \\ Y &= K \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{y}}} p_{\bar{y}j} S_r(\lambda_{\bar{y}j}) \\ Z &= K \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{z}}} p_{\bar{z}j} S_r(\lambda_{\bar{z}j}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Le fait d'échantillonner les données spectrales à l'aide de trois ensembles de longueurs d'onde est un handicap pour l'efficacité algorithmique de la méthode. En effet, chaque intégration est aussi exacte qu'une intégration à l'aide de Riemann, pour un nombre de longueurs d'onde environ deux fois inférieur. Mais, les ensembles ne coïncidant pas nécessairement, on se ramène à une efficacité relative par rapport à Riemann, de $\frac{3}{2}$. Borges dans [Bor94] a proposé une solution à ce problème, en déterminant un unique ensemble optimal de longueurs d'onde, valable pour les trois fonctions colorimétriques, et auquel correspondent trois ensembles de poids.

Le cas des spectres comportant des pics n'est pas pris en compte par cette méthode de Gauss-Legendre.

4.2.1.4 Gauss-Legendre dans l'espace AC1C2

Meyer, dans [Mey88], a proposé d'appliquer la méthode de Gauss-Legendre à trois nouvelles fonctions colorimétriques $\bar{a}(\lambda)$, $\bar{c}_1(\lambda)$ et $\bar{c}_2(\lambda)$.

L'espace AC_1C_2 correspondant est obtenu par redirection des axes couleurs, par rapport à l'espace XYZ , afin que ceux-ci passent à travers les régions les plus denses en composantes trichromatiques. La corrélation entre ces axes est de plus minimisée. Et, chacun d'entre eux se voit doté d'une importance relative: le premier est porteur de plus d'information que le deuxième, et le deuxième que le troisième.

Le passage de l'espace XYZ vers AC_1C_2 se fait à l'aide de la matrice suivante:

$$\begin{pmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0177 & 1.0090 & 0.0073 \\ -1.5370 & 1.0821 & 0.3209 \\ 0.1946 & -0.2045 & 0.5264 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

La fonction $\bar{a}(\lambda)$ est porteuse de l'information lumineuse, et est assez proche de l'efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision photopique ($V(\lambda) = \bar{y}(\lambda)$). La fonction $\bar{c}_1(\lambda)$ se rapporte à l'opposition rouge-vert, et $\bar{c}_2(\lambda)$ à l'opposition bleu-jaune. La figure 4.1 donne la forme de ces fonctions.

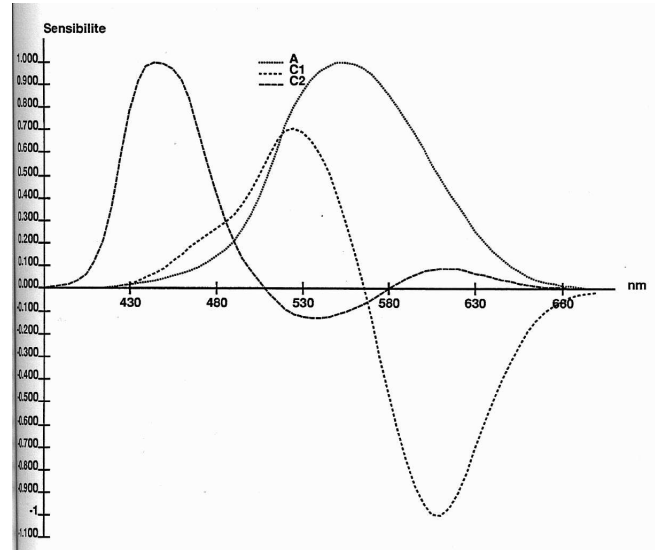


FIG. 4.1 – Fonctions colorimétriques \bar{a} , \bar{c}_1 et \bar{c}_2

En appliquant une méthode de Gauss-Legendre à l'aide de ces trois fonctions, on détermine trois ensembles de couples (poids, longueur d'onde) que l'on notera:

- $(p_{\bar{a}j}, \lambda_{\bar{a}j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{a}}$;
- $(p_{\bar{c}_1j}, \lambda_{\bar{c}_1j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{c}_1}$;

- $(p_{\bar{c}_2 j}, \lambda_{\bar{c}_2 j})$ avec $1 \leq j \leq m_{\bar{c}_2}$;

Ce choix de poids et de longueurs d'onde est optimal en terme de calcul de composantes trichromatiques. Leurs valeurs numériques, pour des ordres d'intégration allant de 1 à 8, figurent en annexe A. Notons que, comme les fonctions \bar{c}_1 et \bar{c}_2 sont en partie négatives sur le domaine du visible, certains ordres d'intégration ne sont pas permis. Il faut, dans tous les cas, simplement veiller à ce que l'on ait : $m_{\bar{a}} \geq m_{\bar{c}_1} \geq m_{\bar{c}_2}$.

Les produits spectre-réfectance se font longueur d'onde à longueur d'onde. Et le passage en coordonnées trichromatiques AC_1C_2 nécessite les calculs suivants :

$$\begin{aligned} A &= \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{a}}} p_{\bar{a}j} S_r(\lambda_{\bar{a}j}) \\ C_1 &= \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{c}_1}} p_{\bar{c}_1 j} S_r(\lambda_{\bar{c}_1 j}) \\ C_2 &= \sum_{j=1}^{j=m_{\bar{c}_2}} p_{\bar{c}_2 j} S_r(\lambda_{\bar{c}_2 j}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dès lors, on peut repasser à des composantes XYZ , par le calcul matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 0.7311 & -0.6130 & 0.3636 \\ 1.0030 & -0.0123 & -0.0063 \\ 0.1194 & 0.2218 & 1.7628 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Comme nous le verrons dans nos tests, ce dernier calcul handicape lourdement l'algorithme, et annule pratiquement les avantages que peuvent apporter l'espace AC_1C_2 . Cette remarque peut paraître injuste, mais l'espace XYZ étant standard, nous avons estimé qu'il fallait en repasser par là.

Cet algorithme ne permet pas de prendre en compte les spectres avec pics.

4.2.1.5 Méthode mixte

Cette méthode, que nous avons nommé mixte, décrite dans [DMCP94], consiste à échantillonner les données spectrales de manière plus fine que précédemment, afin de s'adapter à tous les cas possibles.

A nouveau, on se place dans l'espace AC_1C_2 . La première partie du pré-traitement consiste à partitionner le domaine du visible en une suite d'intervalle, SI , en fonction de la distribution spectrale de la source.

Pour cela :

- on détermine les parties où le spectre est nul. Cela est utile, par exemple, dans le cas d'une lampe à vapeur de sodium, dont le spectre n'est qu'une suite discontinue de pics;

- on distingue pour le reste, le continuum d'avec les pics. Dans ce but, on évalue un gradient le long des intervalles concernés. Lorsque celui-ci dépasse un certain seuil, on a isolé un pic.

La figure 4.2 illustre cette procédure.

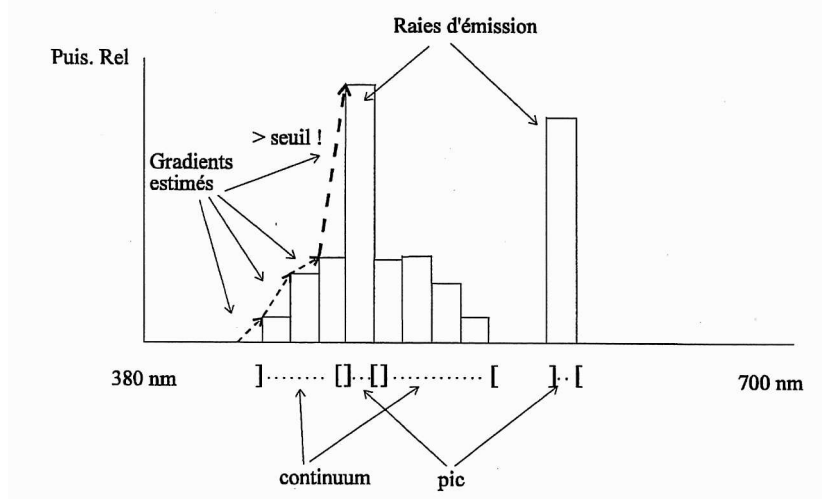


FIG. 4.2 – *Segmentation du domaine visible*

Si l'on veut effectuer des calculs colorimétriques pour des scènes comportant un certain nombre n de types différents de source, il faut concaténer les suites d'intervalles SI_1, \dots, SI_n , en une seule suite SI_f .

La deuxième partie du pré-traitement, consiste à déterminer trois familles de poids et de longueurs d'onde, en considérant d'une part le découpage SI_f , et d'autre part les fonctions colorimétriques: \bar{a} , \bar{c}_1 et \bar{c}_2 .

Selon la nature de chaque intervalle de SI_f , on procède comme suit:

- Si l'intervalle en question correspond à un continuum, on applique Gauss-Legendre. Autrement dit, on calcule à un ordre donné, pour chaque fonction colorimétrique, les poids et longueurs d'onde nécessaires. Si, sur l'intervalle concerné, \bar{c}_1 ou \bar{c}_2 ont des parties négatives, on le subdivise en deux. Sur la partie positive, on observe la procédure normale. Et sur l'autre, il suffit de remarquer que:

$$\int_a^b S(\lambda) \bar{w}(\lambda) d\lambda = - \int_a^b S(\lambda) (-\bar{w})(\lambda) d\lambda$$

où \bar{w} désigne \bar{c}_1 ou \bar{c}_2 . En se ramenant à des fonctions de poids toujours positives, tous les ordres d'intégration deviennent possibles.

- Si l'intervalle en question correspond à un pic, on y place obligatoirement une longueur d'onde λ_{raie} ⁶. Et les poids sont calculés de la façon suivante:

$$\begin{aligned} p_{\bar{a}raie} &= \bar{a}(\lambda_{raie}) * 5nm \\ p_{\bar{c}_1raie} &= \bar{c}_1(\lambda_{raie}) * 5nm \\ p_{\bar{c}_2raie} &= \bar{c}_2(\lambda_{raie}) * 5nm \end{aligned}$$

A l'issue de ce pré-traitement, comme pour un algorithme classique de Gauss-Legendre appliqué dans l'espace AC_1C_2 , on se retrouve avec trois ensembles de poids et de longueurs d'onde. Simplement, on a tenu compte de la complexité des spectres des sources, en y incluant la présence d'éventuelles discontinuités. Les opérations de produit spectre-réflectance et de passage à des coordonnées trichromatiques, sont exactement les mêmes que pour l'algorithme décrit précédemment.

La méthode mixte que nous venons de présenter appelle un certain nombre de remarques quant à son implémentation.

Nous avons défini le gradient nécessaire à la segmentation du spectre visible de la manière suivante:

$$Grad(S)(\lambda_j) = \frac{S(\lambda_{j+1}) - S(\lambda_j)}{\delta\lambda = 5nm} \text{ avec } 1 \leq j \leq 63$$

L'ajustement du seuil permettant de détecter des raies d'émission a été fait de manière empirique. Par essai-erreur, sa valeur a été fixée numériquement à 0.003 (avec des spectres de source normalisés par rapport à leur valeur maximum), ce qui permettait d'isoler les pics de la source fluorescente utilisée pour nos tests, et de n'en pas trouver pour les sources réputées de spectre continu (C et D6500). Cette façon de faire n'est pas très satisfaisante, puisque si l'on a à traiter une nouvelle source, on ignore si la valeur déterminée auparavant conviendra toujours. En fait, en cas de doute, il vaut mieux certainement laisser l'opérateur préciser l'emplacement des pics.

Nous avons convenu d'utiliser pour les intervalles correspondant à du continuum, des ordres d'intégration liés à la largeur de ces intervalles. Autrement dit, l'utilisateur fixe un nombre moyen de longueurs d'onde (m_{moy}) pour l'ensemble du visible $[\lambda_{inf}, \lambda_{sup}]$. Puis, pour chaque intervalle $[\lambda_a, \lambda_b]$, l'ordre m est déterminé de la façon suivante:

$$m = \text{arrondi}\left(m_{moy} \frac{\lambda_b - \lambda_a}{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}}\right)$$

où *arrondi* désigne la fonction qui arrondit à l'entier le plus proche.

Notons enfin que nous avons implémenté une variante de cette méthode, en utilisant directement l'espace XYZ . Les fonctions \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} étant toutes positives, il n'y avait pas de sous-segmentation à effectuer.

⁶. Pour la raison indiquée plus haut, concernant le calcul de référence pour les sources avec pic, cette longueur d'onde est une des 64 de l'échantillonnage d'origine

4.2.2 Projection sur une base de fonctions

Ce type de solution consiste à projeter les données spectrales sur une base de fonctions. La seule erreur introduite dans les calculs colorimétrique provient alors de l'approximation issue de cette projection. Le passage en composantes trichromatiques peut, lui, se faire de manière formelle et donc sans introduire de nouvelles erreurs.

Comme l'a fait remarquer Wandell dans [Wan87], les méthodes d'échantillonnage se ramènent en fait à une projection sur une base de fonctions, au sens d'un peigne de Dirac.

4.2.2.1 Base polynomiale

Dans [RF91] les auteurs ont proposé de s'appuyer une représentation en polynômes par morceaux.

Les fonctions de réflectance sont ainsi approximées par deux polynômes de degré 3, chacun d'entre eux étant défini sur une moitié du domaine visible ($[\lambda_{inf}, 550nm],]550nm, \lambda_{sup}]$). Les coefficients des polynômes sont déterminés par ajustement au sens des moindres carrés.

Les spectres des sources, souvent complexes, ne pouvant être précisément représentés par projection sur cette base, il est préférable d'en garder la représentation d'origine (soit les 64 échantillons dans notre cas).

Les calculs d'inter-réflexion se ramènent à des produits de polynômes. Afin d'éviter que le degré des polynôme n'augmente et ne devienne trop important au final, les auteurs proposent d'utiliser une technique de réduction du degré, employée après chaque produit, afin de rester à une valeur constante de 3, en s'appuyant sur l'utilisation de polynômes de Tchebichev.

Pour effectuer le passage en composantes trichromatiques, les fonctions colorimétriques sont elles aussi approximées par deux polynômes de degré 3.

Cette algorithm est cité à titre pédagogique, car il semble naturel en notre domaine, lorsque l'on parle de projection sur une base de fonctions, de penser à des polynômes. Cependant, nous ne l'avons pas implémenté. Seule une brève information, issue d'un mini-projet d'élèves de première année de l'école, le concernera lors du paragraphe 4.3.3.

4.2.2.2 Base construite par Analyse en Composantes Principales

La méthode présentée dans [Pee93] s'appuie sur une étude un peu plus complète que pour les méthodes précédentes des données spectrales de la scène dont le rendu doit être calculé.

Cet algorithm consiste dans un premier temps à construire une base de fonctions $(E_1(\lambda), \dots, E_m(\lambda))$ orthonormée. Celle-ci est obtenue par Analyse en Composantes Principales (ACP) d'une famille de spectres que l'on considérera représentative des divers cas que l'on aura à traiter. L'annexes B contient une description mathématique

de la méthode d'ACP.

Pour réunir une famille représentative de spectres, dans une scène comportant par exemple une source de lumière d'émission spectrale S_s , et n matériaux de fonctions de réflectance r_1, \dots, r_n , on suppose que l'on sera amené à considérer lors du rendu, puis du passage vers des composantes trichromatiques, et ce sans aucune considération géométrique, les spectres suivants:

- S_s , si la source est vue directement;
- $S_s r_1, \dots, S_s r_n$ pour les cas de réflexions primaires;
- $S_s r_i r_j$ avec $1 \leq i, j \leq n$, pour les cas de réflexions secondaires;
- etc.

Notons qu'il s'agit juste d'une étape de pré-traitement. Aussi, se pose la question: jusqu'où faut-il aller dans les niveaux d'inter-réflexions? Cela peut dépendre, par exemple, de la complexité de la scène, de l'exactitude désirée, ou du temps d'exécution toléré pour ce pré-traitement.

Plaçons-nous maintenant dans un formalisme d'algèbre linéaire, où chaque spectre peut être considéré comme un vecteur à 64 dimensions. Supposons que la famille représentative contienne m spectres. Rien ne nous assure que les vecteurs de cette famille ne soient pas liés entre eux. Ils engendrent, en fait, un hyperplan de dimension au plus m . Et m est inférieur ou égal à 64^7 . Dès lors, les vecteurs (E_1, \dots, E_m) ne forment une base que pour cet hyper-plan⁸. Cette base est orthonormée, et possède de plus la caractéristique de donner un ordre d'importance aux vecteurs la constituant. Ainsi, E_1 est plus porteur d'information que E_2 , E_2 que E_3 et ainsi de suite. On peut donc se contenter d'approximer les vecteurs de la famille représentative par leur projection sur uniquement les p premiers E_i . La méthode d'analyse en composantes principales nous assure que la somme des erreurs commises lors de cette approximation, pour les vecteurs de la famille d'origine, est minimisée au sens des moindres carrés.

Ainsi, tout spectre sera dorénavant décrit par seulement p paramètres. Par exemple, pour la source S_s , ce sera le vecteur:

$$\begin{pmatrix} S_{s1} \\ S_{s2} \\ \vdots \\ S_{sp} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

où: $S_{si} = \langle S_s, E_i \rangle$.

7. Dans le cas où m est exactement égal à 64, la famille représentative permet d'engendrer tous les spectres possibles sur le domaine du visible. Ce cas n'est évidemment pas celui que l'on rencontre en général.

8. Si l'hyper-plan d'origine est de dimension inférieure à m , certains des vecteurs E_i seront égaux.

Remarquons, dès lors, les deux types d'erreur associés à cette représentation, qui peuvent intervenir et s'ajouter. Si l'on considère un spectre S n'appartenant pas à la famille représentative (soit, par exemple, celui issu d'une réflexion multiple d'ordre supérieur à celui auquel on s'était arrêté en vue du pré-traitement), alors:

- la première erreur provient du fait que l'on ne parle plus du spectre lui même, mais de son projeté orthogonal sur l'hyper-plan, soit le vecteur de coordonnées: $\langle S, E_1 \rangle, \dots, \langle S, E_m \rangle$;
- suite à l'hypothèse issue de l'ACP, on ne retient que p coordonnées.

Pour les spectres appartenant à la famille d'origine, et donc contenus dans l'hyper-plan, seule la deuxième erreur intervient.

Les fonctions de réflectance, dans ce formalisme, prennent la forme de matrices $p \times p$. Ainsi, à chaque r , on associe la matrice R , dont les coefficients sont:

$$R_{ij} = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} r(\lambda) E_i(\lambda) E_j(\lambda) d\lambda \quad (4.11)$$

Chaque R_{ij} est la projection du spectre $E_i r$ sur E_j .

Enfin, le passage d'un spectre représenté par p paramètres vers des composantes trichromatiques s'effectue par produit matriciel, à l'aide d'une matrice T de 3 lignes et p colonnes, dont les coefficients sont:

$$\begin{aligned} T_{1,i} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} E_i(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ T_{2,i} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} E_i(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ T_{3,i} &= K \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} E_i(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4.12)$$

En pratique, les sommations utilisées ici sont du même type que pour le calcul de référence.

La méthode que nous venons de décrire est suffisamment générale pour traiter tous les types de spectres. Ainsi, dans le cas d'une source comportant des raies d'émission, toutes les fonctions de base (E_1, \dots, E_p) posséderont des pics à ces endroits là. Et, cela est transparent pour l'utilisateur, qui se contente de manipuler les p paramètres descriptifs de tout spectre.

4.3 Comparaison des méthodes

Les procédures utilisées et les résultats de tests proviennent de mon rapport de stage de DEA [Rou94].

4.3.1 Base de donnée

Pour cette série de tests, trois types de sources ont été utilisés:

- Deux illuminants standards: C et D6500;
- une source fluorescente, comportant 4 pics, dont les valeurs numériques sont extraites de [WS82], pages 162 et 163.

Les réflectances utilisées (au nombre de 24), sont issues de l'échiquier couleur de Macbeth [CMD76]. Celui-ci a été élaboré afin de rendre compte au mieux des problèmes de restitution couleur auxquels sont confrontés les domaines de la photographie, du cinéma ou de la télévision. Ainsi, il comporte des modèles de réflectance de peau humaine, de ciel, de fleurs, de feuillages, de couleurs allant du violet à l'orange, de couleurs RVB, CMY, et enfin de niveaux de gris. Les figures 4.3 représentent ces diverses fonctions.

4.3.2 Première série de tests

Pour chaque méthode, à un ordre donné, chaque spectre de source et chaque fonction de réflectance, nous avons effectué les opérations suivantes:

- un produit spectre-réflectance;
- un passage vers des composantes trichromatiques XYZ .

Puis, à chaque fois, on a évalué l'erreur colorimétrique commise par rapport à la méthode de référence à l'aide de la formule de distance issue de l'espace CIELUV⁹.

Les figures qui suivent indiquent les distances Luv moyennes, pour les 24 réflectances, en fonction du coût des opérations effectuées par chaque méthode.

Afin de pouvoir comparer les méthodes entre elles, on a comptabilisé le coût des opérations en nombre de multiplications et nombre d'additions. Les multiplications se sont vues affecter un poids de 10, et les additions un poids de 1. Etant donné l'évolution des coprocesseurs arithmétiques, où multiplications et additions pour des nombres en virgule flottante s'effectuent avec le même temps d'exécution, ce choix peut paraître contestable. Cependant, nous pensons qu'il ne change pas radicalement les conclusions que nous présenterons.

Notons que pour la méthode utilisant une base de fonctions construite par ACP, on a utilisé une famille représentative contenant le spectre de la source et l'ensemble des 24 réflexions primaires.

Les figures 4.4, 4.5 et 4.6 présentent les résultats de cette première série de test. Notons que:

- GLXYZ et GLAC1C2 désignent les méthodes basées sur Gauss-Legendre, respectivement dans l'espace XYZ et AC_1C_2 ;

9. Le blanc de référence utilisé était D65.

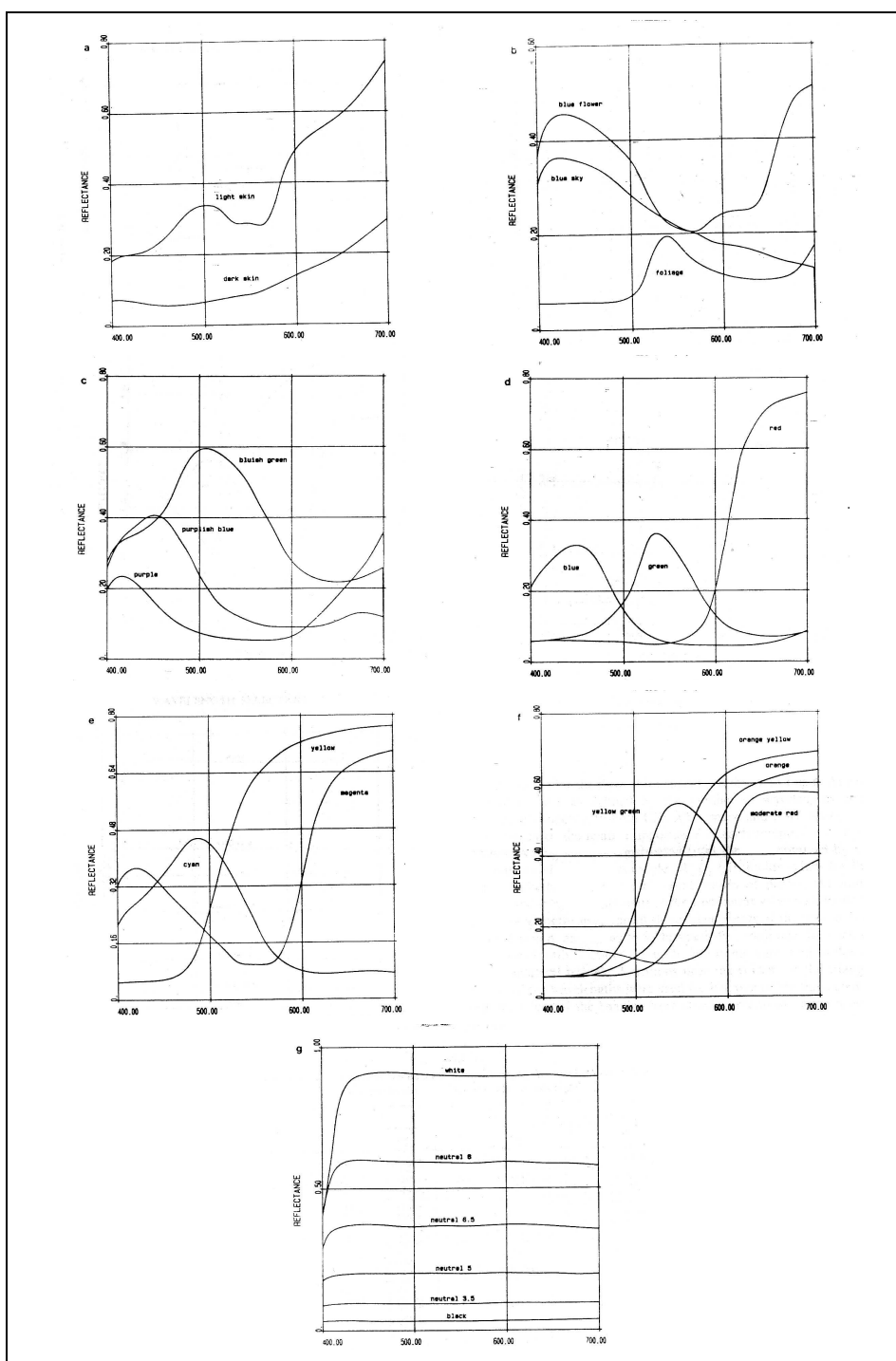


FIG. 4.3 – Fonctions de réflectance issues de l'échiquier de Macbeth

- MXYZ et MAC1C2 désignent les méthodes mixtes respectivement dans l'espace XYZ et AC_1C_2 ;
- BDF ACP désigne la méthode utilisant une base de fonctions construite par ACP.

4.3.3 Analyse des résultats

Pour les sources C et D6500:

- Produits spectre-réflexance:
La méthode de Riemann est moins coûteuse que celles utilisant Gauss-Legendre. Comme nous l'avons signalé plus haut, un seul ensemble de longueur est nécessaire pour Riemann, alors qu'il en faut trois avec Gauss-Legendre. La méthode utilisant la base de fonctions construite par analyse en composantes principales est la plus coûteuse, car elle requiert pour chaque réflexion d'effectuer un produit matriciel;
- Passage en composantes trichromatiques:
L'ordre s'inverse. La méthode de Riemann est moins performante que celles utilisant Gauss-Legendre. Et la méthode utilisant la base de fonctions construite par ACP surclasse toutes les autres. A nouveau, l'explication de ce phénomène a été évoquée plus haut. Dans ce type de solution utilisant une base de fonctions, la seule erreur commise provient de l'approximation des données spectrales. Le passage en composantes trichromatiques se fait de manière simple, rapide et surtout formellement.

Pour la source fluorescente:

- Comme le montre la figure correspondante, les méthodes de Riemann et de Gauss-Legendre sont inopérantes;
- Produits spectre-réflexance:
Les trois courbes sont quasiment équivalentes. On peut remarquer, toutefois, que la méthode mixte en XYZ est celle pour laquelle on obtient le plus vite une erreur Luv inférieure à 1, suivie par celle utilisant l'espace AC_1C_2 , puis par celle s'appuyant sur les bases de fonctions;
- Passage en composantes trichromatiques:
Pour la même raison que ci-dessus, la méthode utilisant une base de fonctions construite par ACP est la plus performante.

Si on se concentre sur l'objectif d'obtenir des erreurs indiscernables, soit $\epsilon_{Luv} \leq 1$, alors:

- Pour la méthode de Riemann, et des sources à spectre continu, il faut un ordre d'intégration environ égal à 17. Cela signifie qu'en moyenne, pour notre base

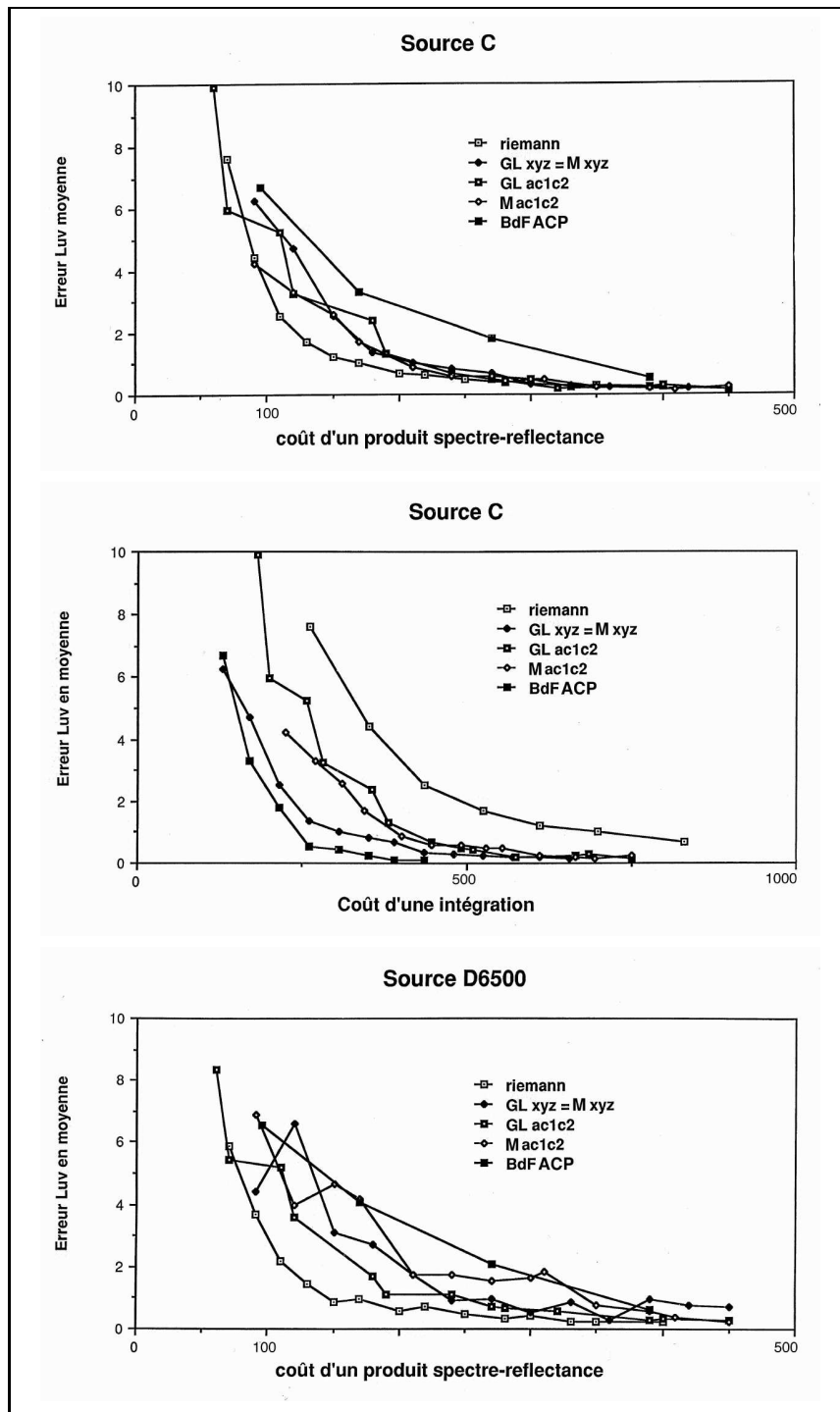


FIG. 4.4 – Résultats de la première série de test (Partie 1)

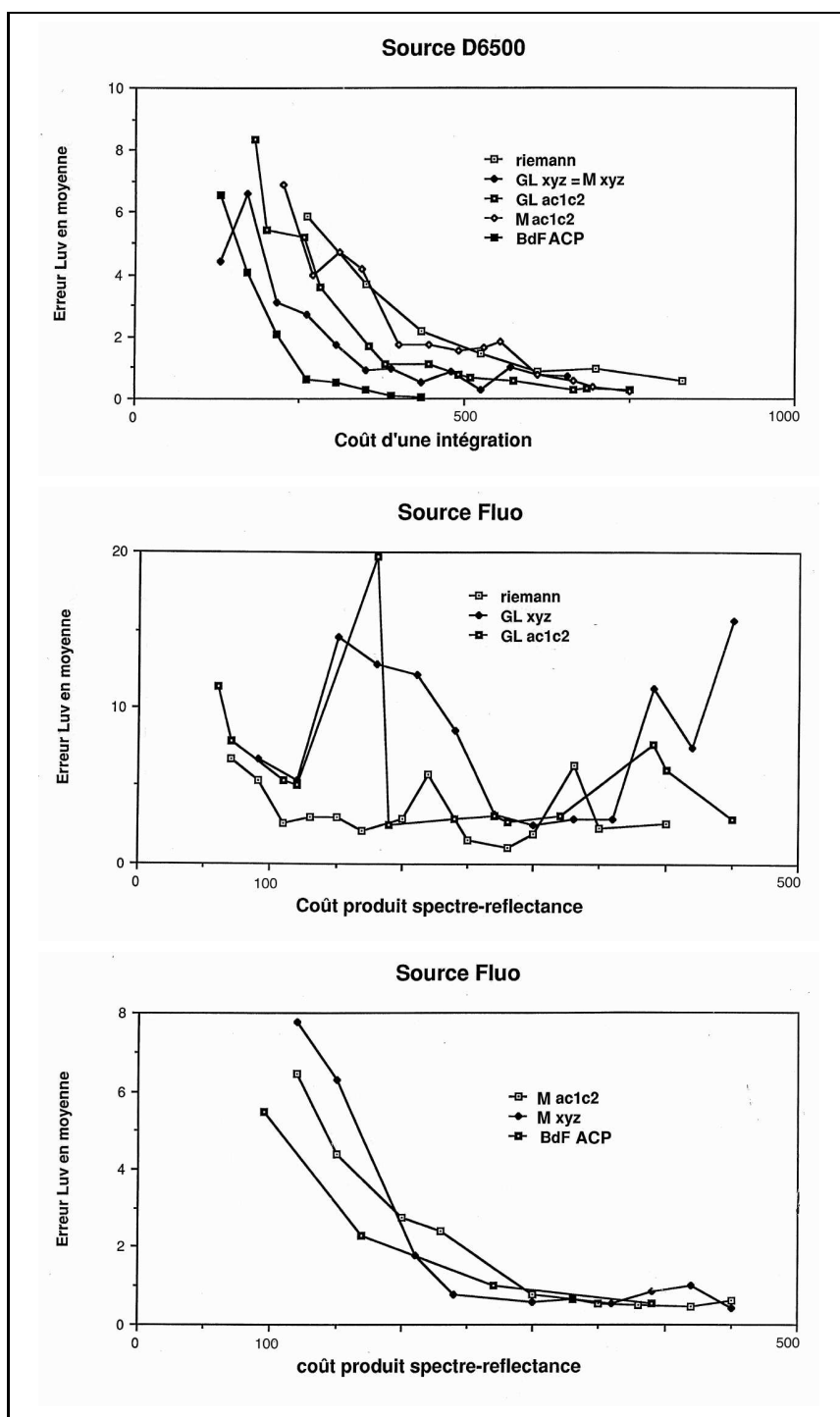


FIG. 4.5 – Résultats de la première série de test (Partie 2)

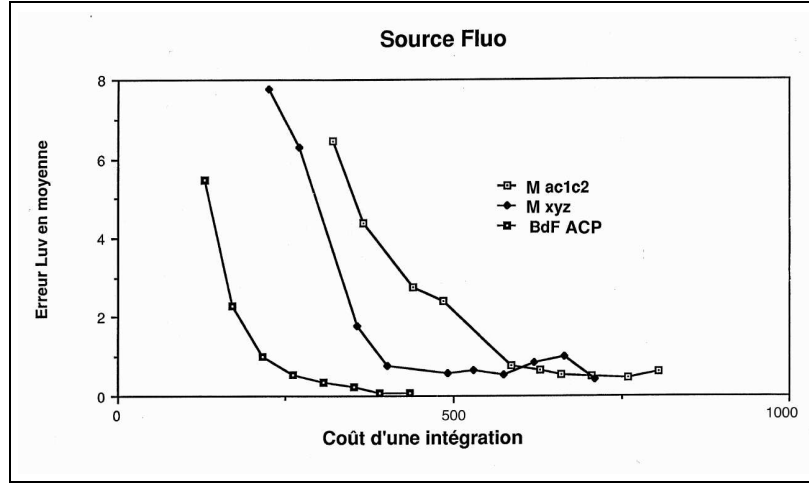


FIG. 4.6 – Résultats de la première série de test (Partie 3)

de données, un échantillonnage uniforme par pas de 20 nm donne des résultats colorimétriques indiscernables d'un échantillonnage par pas de 5 nm.

- Pour les méthodes de Gauss-Legendre, et des sources à spectre continu, il faut environ $3 \times 8 = 24$ échantillons. On retrouve le ratio de $\frac{3}{2}$ évoqué plus haut.
- Pour la méthode mixte, dans l'espace XYZ, il faut environ $24 + 4$ (pics) échantillons. Notons que dans notre implémentation, les résultats de la méthode initiale, définie dans l'espace AC_1C_2 sont un peu en retrait. Cela provient de la sous-segmentation utilisée pour les intervalles où les fonctions \bar{c}_1 et \bar{c}_2 sont négatives.
- Pour l'utilisation d'une projection des données spectrales sur une base polynomiale, il semble qu'il faille utiliser deux polynômes de degré 4 chacun.
- Pour l'utilisation d'une base de fonctions construite par analyse en composantes principales, il faut 6 fonctions de base.

4.3.4 Deuxième série de tests

Ces tests ont été effectués en vue, non plus de classer les méthodes entre elles, mais d'apprécier leurs robustesses respectives. Nous avons pour cela mesuré des distances Luv avec les résultats issus de la méthode de référence, pour des cas de réflexions secondaires.

Ces cas sont ceux des spectres: $S_s R_i R_j$ avec $1 \leq i, j \leq 24$. Et comme les produits sont commutatifs, cela représente: $24 + 23 + 22 + \dots + 1 = 300$ cas.

Les graphiques qui suivent ne présentent pas de manière exhaustive l'ensemble des résultats, mais tendent à donner une idée du comportement général des diverses méthodes.

Les deux premières figures 4.7 concernent la méthode de Riemann, et la source C, et fournissent:

- L'erreur couleur calculée dans l'espace CIELUV, moyennée sur l'ensemble des cas;
- L'erreur couleur dans le pire des cas;

le tout exprimé en fonction de l'ordre d'intégration.

Les deux figures 4.8 apportent le même type d'information pour la méthode utilisant une base de fonctions construite par ACP, et la source D6500. Notons que deux familles représentatives différentes ont été utilisées pour la construction de la base (E_1, \dots, E_p) :

- La première est identique à celle employée pour la première série de tests. C'est la famille 1;
- La deuxième contient, le spectre de la source, les réflexions primaires, et les réflexions secondaires $(S_s R_i R_j \ 1 \leq i, j \leq 24)$. C'est la famille 2.

Ceci est fait dans le but d'évaluer la validité de l'analyse statistique.

4.3.5 Analyse des résultats

A la vue des graphiques concernant l'algorithme de Riemann, on peut s'apercevoir que les erreurs couleurs sont plus faibles en moyenne pour les réflexions secondaires que pour les primaires. Cela peut se concevoir si l'on considère qu'après deux réflexions, les couleurs obtenues sont plus sombres, et qu'il est donc plus difficile de distinguer une erreur colorimétrique commise par rapport à la méthode de référence. Les tests concernant la méthode adaptative que nous présenterons ci-dessous (cf. 4.4.8) semblent infirmer ce fait. Le comportement des distances évaluées dans les espaces préconisés par la CIE, pour des couleurs sombres (et quasi achromatiques), semble parfois défier le sens commun.

Si on considère les résultats dans le pire des cas, les erreurs couleurs sont plus grandes pour les réflexions secondaires que pour les primaires.

Concernant la méthode utilisant une base de fonction construite par ACP, les résultats sont de nature similaire. Notons que l'élargissement de la famille représentative au cas des réflexions secondaires a été relativement payante. Evidemment, en contre-partie, cette opération de pré-traitement s'est avérée assez coûteuse en temps et mémoire, puisqu'il s'agissait de diagonaliser une matrice 325×325 . Il faut donc savoir, en l'occurrence, si le jeu en vaut la chandelle.

4.3.6 Conclusion

Nous avons présenté, sans être exhaustif, un certain nombre de méthodes permettant d'effectuer des calculs spectraux.

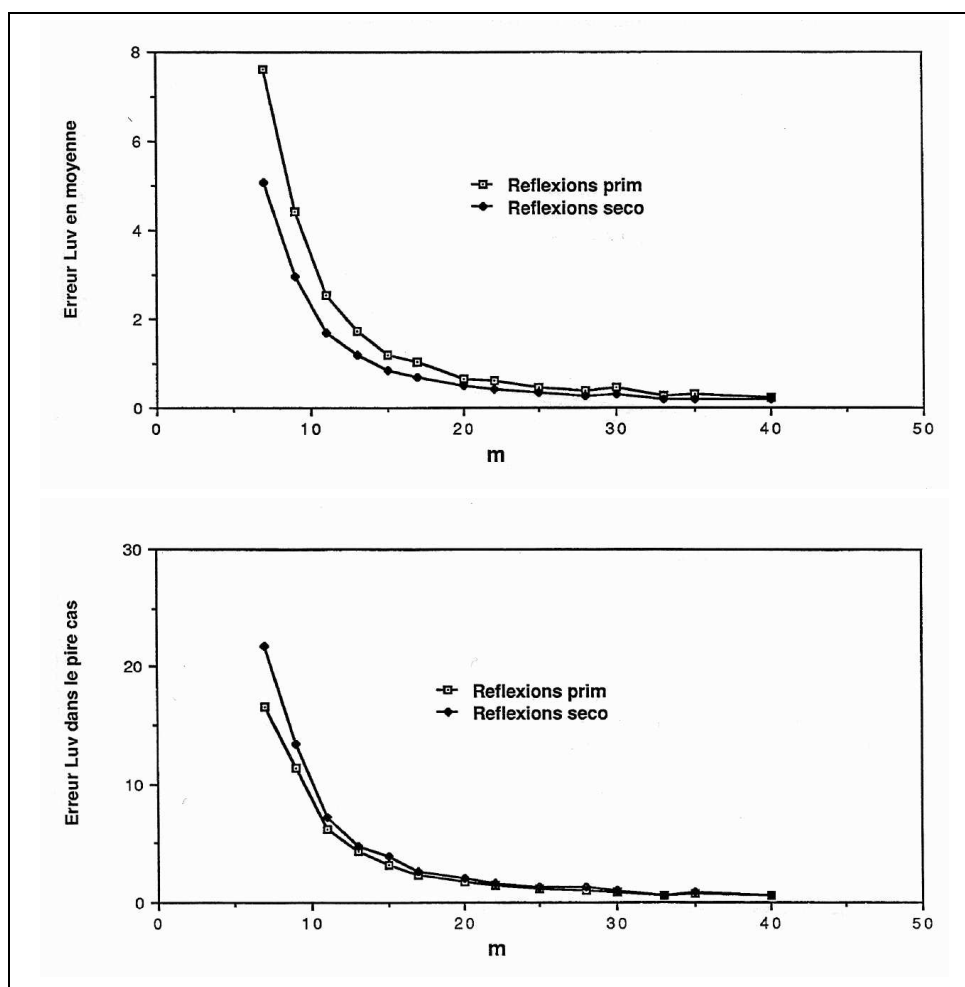


FIG. 4.7 – Résultats de la deuxième série de test (Source C, méthode de Riemann)

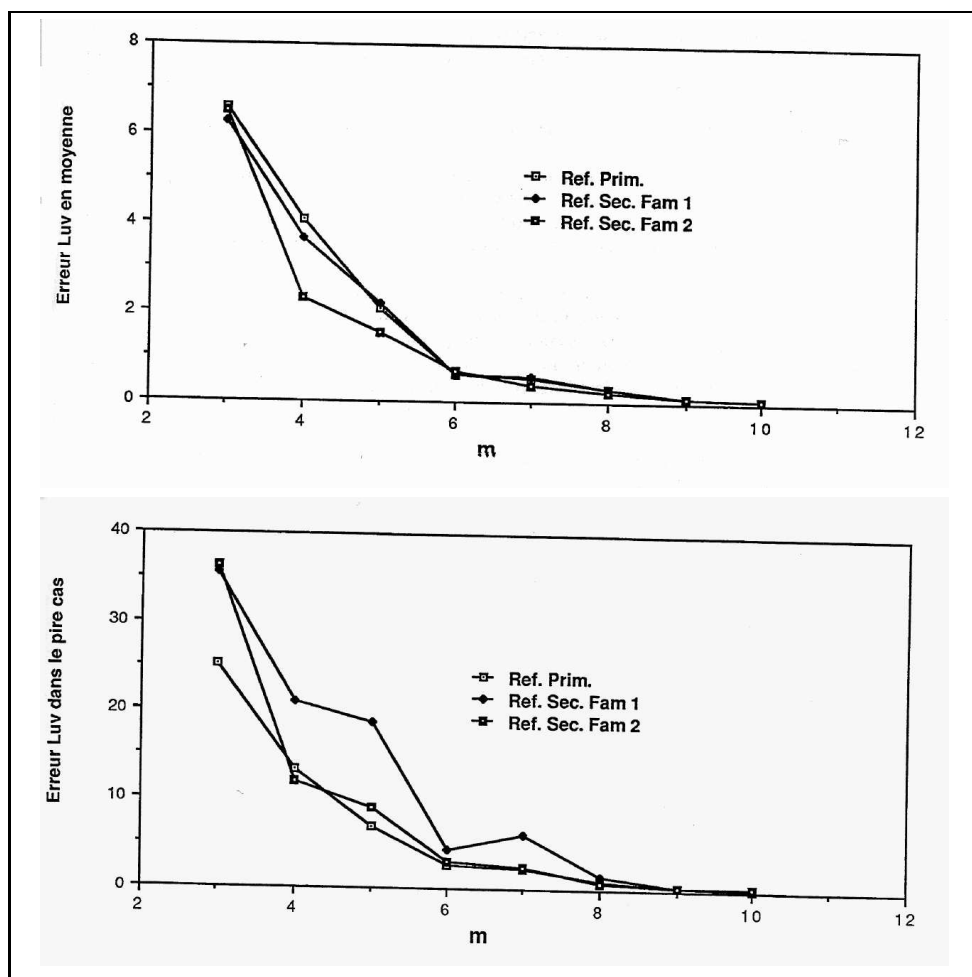


FIG. 4.8 – Résultats de la deuxième série de test (Source D6500, méthode BdF ACP)

Les méthodes d'échantillonnage permettent d'effectuer des opérations de produit spectre-réfectance très rapidement. En revanche, elles sont assez coûteuses, lors du passage vers des composantes trichromatiques. Ces méthodes sont celles qui ont été le plus souvent intégrées dans des logiciels de rendu, car les transformations informatiques nécessaires pour passer d'un modèle RGB classique à un modèle spectral sont assez faciles à mettre en oeuvre.

Les méthodes utilisant une base de fonctions subissent un fort handicap lorsqu'il s'agit d'effectuer des produits spectre-réfectance. Ainsi, les fonctions polynomiales ne sont pas stables par produit. Il faut donc utiliser une méthode assez coûteuse de réduction du degré, après chaque réflexion, pour rester dans l'espace des polynômes de degré trois. Les fonctions de la base construite par ACP sont, elles, stables par multiplication, mais conduisent à effectuer des produits matriciels¹⁰. Ces méthodes sont très efficaces, en revanche, pour l'opération de passage vers des composantes trichromatiques. Leur mise en oeuvre informatique est plutôt ardue, car elles induisent un assez grand nombre de changements par rapport à une méthode de rendu classique.

La deuxième série de tests a mis en avant un point assez important. Des erreurs perceptibles peuvent apparaître à n'importe quel niveau d'inter-réflexion, quelle que soit la méthode utilisée, et quel que soit le nombre d'échantillons ou de fonctions de base employé. Chaque calcul pouvant être un cas particulier, il faudrait donc contrôler l'erreur commise en cours de calculs. Si on s'aperçoit que la représentation des données spectrales n'est pas assez fine, il faut en augmenter la précision. Et inversement, si l'on se trouve très en dessous du seuil de perceptibilité, on peut éviter un surcoût inutile de calcul, en diminuant la précision de la représentation. Or, ceci est impossible avec les méthodes que nous venons de présenter. Avec Riemann ou Gauss-Legendre, rajouter ou enlever un échantillon oblige à tout recalculer. De même pour la méthode utilisant une base de polynômes, si on veut augmenter ou diminuer leurs degrés. L'algorithme utilisant une base de fonctions construite par ACP permet cette progressivité, mais seulement jusqu'à un certain point. En effet, même en prenant en compte tous les vecteurs de base, on ne peut bien approximer que les spectres constituant la famille représentative. En fait toute méthode s'appuyant sur un tel pré-traitement oblige à prendre en considération tous les niveaux d'inter-réflexions. Il paraît plus réaliste de se contenter d'une estimation de l'erreur commise en cours de calcul.

Dans [ZCB97], les auteurs proposent une démarche allant dans le sens de l'adaptativité. Leur méthode, décrite d'abord dans un cadre statique, consiste, lors d'un pré-traitement, à ne sélectionner que les longueurs d'onde importantes de la source contenue dans la scène. Ce processus s'appuie sur une erreur en norme 1, calculée par rapport au spectre initial, et contrainte à demeurer inférieure à un certain seuil. Le cas où plusieurs sources de types différents sont en présence dans la scène peut lui aussi être pris en compte, par extension du processus. Les fonctions de réflectance sont alors discrétisées aux longueurs d'onde désignées, et on peut mener à bien les calculs colorimétriques. D'autre part, les auteurs proposent d'utiliser dynamiquement cette méthode, dans le

10. Dans le cas de réflexions primaires, et afin d'obtenir des erreurs indiscernables en moyenne, par rapport à la méthode de référence, il faut utiliser des matrices 6x6 !

cadre d'un rendu de type radiosité. Lors de chaque réflexion, le spectre incident est reconstruit, par interpolation linéaire, afin de retrouver un échantillonnage aussi fin que celui des spectres initiaux. Puis, le spectre réfléchi, obtenu comme dans la méthode de référence par un produit longueur d'onde à longueur d'onde, se voit à nouveau appliqué le processus de réduction de son nombre d'échantillons. On conserve donc dynamiquement une représentation des données spectrales, la plus économique possible. Mais, l'erreur en cours de calcul étant réellement évaluée, et non simplement estimée, le coût d'une opération de produit spectre-réflectance demeure élevé.

4.4 Méthode adaptative

Cette méthode est décrite dans [RP97a].

4.4.1 Objectifs de la méthode

La méthode que nous proposons s'inspire des diverses remarques que nous venons de faire à propos des résultats concernant l'existant. Elle s'appuie sur un algorithme progressif permettant d'échantillonner les données spectrales. L'erreur est estimée en cours de calcul. Pour l'instant, celle-ci est évaluée directement dans l'espace XYZ , même si celui-ci est connu pour ne pas être uniforme¹¹. Initialement, une étape de pré-traitement permet de recueillir les données et de les organiser dans des structures informatiques, permettant facilement la progressivité. Puis, l'utilisateur spécifie un intervalle d'erreur $[\epsilon_{min}, \epsilon_{max}]$ ¹². Ensuite, pendant l'étape de rendu, l'erreur produite est contrôlée : si elle est en dehors de l'intervalle donné, la représentation de l'information spectrale est modifiée pour mieux convenir aux spécifications de l'utilisateur. Finalement, quand on a besoin des valeurs de tristimulus XYZ , celles-ci peuvent être calculées très rapidement et sans erreur d'imprécision.

La présentation de cet algorithme se fera dans le cadre restreint de scènes ne comportant qu'un seul type de source.

En fait, cette méthode prendra toute sa signification lorsqu'elle sera intégrée à un algorithme de rendu lui-même progressif, tel qu'un lancer de rayon progressif [MCP92] ou une radiosité hiérarchique [HSA91], ce qui est actuellement en cours de réalisation. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

4.4.2  tape de pré-traitement

Afin d'obtenir un fonctionnement progressif de l'algorithme, nous suggérons de projeter l'information spectrale sur un ensemble de fonctions de base, dont la propriété principale est de permettre un raffinement de la représentation dès lors que l'on augmente le nombre de termes pris en compte.

11. Nous proposerons quelques pistes, en fin de chapitre, pour remédier à ce problème

12. Les valeurs de cet intervalle, ont été déterminées empiriquement, voir 4.4.8

4.4.2.1 Choix de l'ensemble de fonctions de base

Les distributions spectrales des sources et les fonctions de réflectance sont connues tous les 5 nm. Ce sont donc des fonctions en escalier. Nous avons alors choisi d'utiliser les fonctions d'échelles ϕ_i^j qui sont généralement associées aux ondelettes de Haar ψ_i^j . Ces fonctions d'échelles sont définies par : $\phi_i^j(x) = 1 \ \forall x \in [\lambda_{inf} + i \frac{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}}{2^j}, \lambda_{inf} + (i+1) \frac{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}}{2^j}]$, $\phi_i^j(x) = 0$ sur le reste de l'intervalle $[\lambda_{inf}, \lambda_{sup}]$.

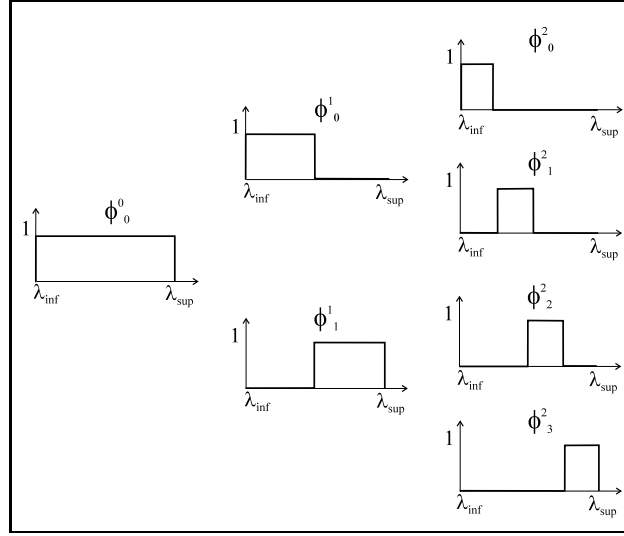


FIG. 4.9 – Fonctions d'échelle

En fait, n'importe quelle combinaison linéaire de fonctions de base telle que :

- les bornes du domaine visible sont atteintes ;
- il n'y a pas de recouvrement entre fonctions ;
- à chaque ϕ_i^j est associé un coefficient f_{moyi}^j qui représente la valeur moyenne de f sur l'intervalle à l'intérieur duquel ϕ_i^j est non nulle ;

pourra être considérée comme une approximation de la fonction f définie sur $[\lambda_{inf}, \lambda_{sup}]$.

Remarquons que cet ensemble de fonctions est stable par multiplication. Pour tout couple (f, g) de fonctions et pour tout triplet (i, j, k) d'indices :

$$(f_{moyi}^j \phi_i^j)(g_{moyi}^j \phi_i^j) = (f_{moyi}^j g_{moyi}^j) \phi_i^j \text{ et } (f_{moyi}^j \phi_i^j)(g_{moyk}^j \phi_k^j) = 0 \text{ si } i \neq k.$$

4.4.2.2 Création de la base de données

Notons tout d'abord que, dans ce paragraphe, la fonction f peut désigner indifféremment le spectre d'une source de lumière ou la réflectance d'un matériau.

Lors de cette étape, nous calculons, pour $0 \leq j \leq 6$ et $0 \leq i \leq 2^j - 1$, la valeur moyenne $f_{moy[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]}$ sur l'intervalle $[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]$ (où $\lambda_i^j = \lambda_{inf} + i \frac{\lambda_{sup} - \lambda_{inf}}{2^j}$) qui minimise $\sum_{\bar{a}=\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}} (\epsilon_{f\bar{a}i}^j)^2$, où

$$\epsilon_{f\bar{a}i}^j = K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (f(\lambda) - f_{moy[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]}) \bar{a}(\lambda) d\lambda \quad (4.13)$$

Si l'on note $f_{moyi}^j = f_{moy[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]}$, la valeur moyenne f_{moyi}^j est donnée par la formule :

$$f_{moyi}^j = \frac{\sum_{\bar{a}=\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}} \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} \bar{a}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} f(\lambda) \bar{a}(\lambda) d\lambda}{\sum_{\bar{a}=\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}} (\int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} \bar{a}(\lambda) d\lambda)^2} \quad (4.14)$$

Bien sûr, pour $j = 6$, on retrouve les valeurs exactes des fonctions en escalier S et R , $0 \leq i \leq 63$.

Cette valeur permet de minimiser l'erreur locale pour chaque intervalle $[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]$. Il faudrait en fait rendre minimum l'erreur colorimétrique totale:

$$(\sum_{\bar{a}=\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}} (\epsilon_{f\bar{a}i}^j))^2$$

Mais à ce moment-là, on perdrait l'aspect progressif de l'algorithme, car à chaque découpage du domaine visible en une série d'intervalles, correspondrait un ensemble de valeurs f_{moyi}^j .

À la fin de cette étape, le spectre de la source de lumière et les réflectances des matériaux sont représentés par des arbres binaires, dont les noeuds contiennent quatre informations :

- la valeur moyenne f_{moyi}^j de la fonction sur l'intervalle $[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]$;
- les trois erreurs $\epsilon_{f\bar{x}}$, $\epsilon_{f\bar{y}}$ et $\epsilon_{f\bar{z}}$ associées à cette valeur moyenne.

Nous calculons aussi un arbre binaire associé aux fonctions d'égalisation couleur \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} . Chacun de ses noeuds contient le résultats des intégrales suivantes :

$$\bar{a}_{moyi}^j = K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} \bar{a}(\lambda) d\lambda$$

Cet arbre binaire sera utilisé lors de l'étape d'intégration.

4.4.2.3 Représentation du spectre de la source de lumière

Le but de cette étape est d'obtenir pour le spectre de la source de lumière une représentation aussi simple que possible, et telle que l'erreur par rapport au tristimulus de référence soit inférieure à ϵ_{max} dans l'espace couleur XYZ . Pour ceci, nous allons procéder à une descente dans l'arbre associé au spectre de la source de lumière.

Pour la racine de l'arbre, l'erreur dans l'espace couleur XYZ entre le spectre complet et sa représentation par une unique valeur moyenne S_{smoy0}^0 sur le domaine du visible est : $\epsilon_t = \sqrt{(\epsilon_{Ss\bar{x}0}^0)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{y}0}^0)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{z}0}^0)^2}$.

Si ϵ_t est plus grand que ϵ_{max} , cette représentation n'est pas suffisamment précise. Il faut descendre d'un niveau dans l'arbre. Le spectre de la source de lumière est alors approximé par deux valeurs moyennes, S_{smoy0}^1 sur l'intervalle $[\lambda_{inf}, (\lambda_{inf} + \lambda_{sup})/2]$ et S_{smoy1}^1 sur l'intervalle $[(\lambda_{inf} + \lambda_{sup})/2, \lambda_{sup}]$. La nouvelle erreur commise est :

$$\epsilon_t = \sqrt{(\epsilon_{Ss\bar{x}0}^1 + \epsilon_{Ss\bar{x}1}^1)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{y}0}^1 + \epsilon_{Ss\bar{y}1}^1)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{z}0}^1 + \epsilon_{Ss\bar{z}1}^1)^2}.$$

Si ϵ_t est à nouveau plus grand que ϵ_{max} , la représentation du spectre doit encore être raffinée. Mais cette fois ci, on recherche l'intervalle sur lequel l'erreur commise est la plus grande, c'est à dire celui pour lequel $\sqrt{(\epsilon_{Ss\bar{x}i}^j)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{y}i}^j)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{z}i}^j)^2}$ est maximal. Supposons que cela soit le premier demi-intervalle. Le spectre de la source de lumière est alors approximé par S_{smoy0}^2 et S_{smoy1}^2 , sur les deux premiers intervalles de longueur un quart du domaine visible, et S_{smoy1}^1 sur le reste. La nouvelle valeur de l'erreur commise est :

$$\epsilon_t = \sqrt{(\epsilon_{Ss\bar{x}0}^2 + \epsilon_{Ss\bar{x}1}^2 + \epsilon_{Ss\bar{x}1}^1)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{y}0}^2 + \epsilon_{Ss\bar{y}1}^2 + \epsilon_{Ss\bar{y}1}^1)^2 + (\epsilon_{Ss\bar{z}0}^2 + \epsilon_{Ss\bar{z}1}^2 + \epsilon_{Ss\bar{z}1}^1)^2}.$$

La figure 4.10 présente l'aspect de la représentation du spectre de la source à ce moment là.

On répète ce processus jusqu'à ce que l'erreur devienne inférieure à ϵ_{max} . A la fin de cette étape, le domaine visible est découpé en une série d'intervalles.

4.4.3 Calcul des produits spectre-réflectance

Il s'agit ici de gérer au niveau spectral l'interaction de la lumière avec la matière. Considérons un spectre incident, noté S_r , qui n'est pas nécessairement celui de la source de lumière. Il est donné sous la forme d'une série d'intervalles partitionnant le domaine visible. A chacun de ceux-ci sont associées une valeur moyenne S_{rmoyi}^j et trois erreurs $\epsilon_{S_r\bar{x}i}^j$, $\epsilon_{S_r\bar{y}i}^j$ et $\epsilon_{S_r\bar{z}i}^j$.

Maintenant, soit R la fonction de réflectance d'un matériau donné, et considérons pour celui-ci la même partition que celle du spectre incident. En consultant l'arbre binaire associé à R , nous pouvons trouver les valeurs moyennes R_{moyi}^j et les erreurs $\epsilon_{R\bar{x}i}^j$, $\epsilon_{R\bar{y}i}^j$ et $\epsilon_{R\bar{z}i}^j$ associées.

Pour chaque intervalle de la partition courante, la valeur du spectre réfléchi $S_r R$ est $(S_r R)_{moyi}^j = S_{rmoyi}^j * R_{moyi}^j$.

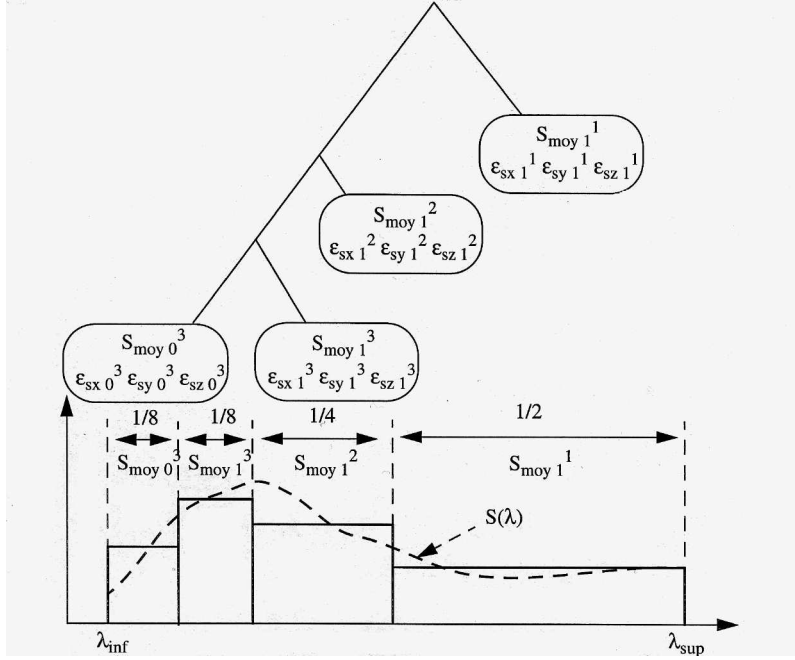


FIG. 4.10 – Partitionnement du domaine visible pour le spectre de la source

Nous devons maintenant estimer les nouvelles erreurs. Par définition :

$$\epsilon_{(S_r R)\bar{a}i}^j = K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) R(\lambda) - S_{rmoyi}^j R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda$$

mais

$$\begin{aligned} \epsilon_{(S_r R)\bar{a}i}^j &= K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) R(\lambda) - S_{rmoyi}^j R(\lambda) + S_{rmoyi}^j R(\lambda) - S_{rmoyi}^j R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\ &= K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j) R(\lambda) \bar{a}(\lambda) d\lambda + K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} S_{rmoyi}^j (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\ &= R_{moyi}^j K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda + S_{rmoyi}^j K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\ &\quad + K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j) (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

Si nous supposons que le terme résiduel $K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j) (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda$ est négligeable alors: $\epsilon_{(S_r R)\bar{a}i}^j \approx R_{moyi}^j \epsilon_{S_r \bar{a}i}^j + S_{rmoyi}^j \epsilon_{R \bar{a}i}^j$.

En conséquence de cette hypothèse, nous n'obtenons qu'une estimation de l'erreur.

Nous verrons plus tard, dans le paragraphe (4.4.8), si cette estimation est assez précise pour prendre la bonne décision en ce qui concerne le traitement des données.

Après le calcul du produit spectre-réflectance, il faut estimer l'erreur totale commise pour le spectre $S_r R$, par rapport au calcul de référence. Nous avons :

$$\epsilon_t = \sqrt{\left(\sum_{intervalles} \epsilon_{S_r R \bar{x}i}^j\right)^2 + \left(\sum_{intervalles} \epsilon_{S_r R \bar{y}i}^j\right)^2 + \left(\sum_{intervalles} \epsilon_{S_r R \bar{z}i}^j\right)^2}$$

Trois cas peuvent survenir :

- ϵ_t appartient à l'intervalle $[\epsilon_{min}, \epsilon_{max}]$. La représentation du spectre réfléchi est satisfaisante. On peut soit procéder à un nouveau produit spectre-réflectance, soit effectuer un passage en coordonnées XYZ par intégration ;
- $\epsilon_t > \epsilon_{max}$. Il faut raffiner la représentation du spectre. Pour cela, il s'agit de détecter l'intervalle pour lequel $\sqrt{(\epsilon_{S_r \bar{x}i}^j)^2 + (\epsilon_{S_r \bar{y}i}^j)^2 + (\epsilon_{S_r \bar{z}i}^j)^2}$ est maximal. Il faut aussi retrouver la liste des réflexions successives menant au résultat courant. Puis, dans l'arbre binaire de la source de lumière et dans ceux associés aux réflectances apparaissant dans la liste, on doit trouver les deux fils du *noeud* _{i} correspondant à l'intervalle désigné. Pour ces deux sous-intervalles, on procède à des produits spectre-réflectance comme décrit ci-dessus. On obtient alors deux nouvelles erreurs moyennes, et deux triplets d'erreur $\epsilon_{S_r \bar{x}}$, $\epsilon_{S_r \bar{y}}$ et $\epsilon_{S_r \bar{z}}$ associés à ces approximations. Après cette étape de raffinement, l'erreur totale est à nouveau estimée afin de déterminer dans quel cas on se trouve ;
- $\epsilon_t < \epsilon_{min}$. La représentation du spectre est trop précise pour nos besoins. L'idée est ici d'éviter des calculs de rendu inutiles par rapport à une appréciation psychovisuelle du résultat. On va fusionner deux intervalles en un seul. Dans la liste courante d'intervalles $[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]$, on recherche ceux dont la profondeur est la plus importante (j maximum). De par la structure de l'algorithme, ces intervalles vont toujours par paires. Choisissons celle pour laquelle $(S_r R_{moyi}^{jmax} - S_r R_{moyi+1}^{jmax})$ est minimum. Notons i_{min} la coordonnée i du premier intervalle. Cette paire d'intervalles est remplacée par un nouvel intervalle de coordonnées : $i_{nouv} = i_{min}/2$ et $j_{nouv} = j_{max} - 1$, et prenons : $S_r R_{moyi_{nouv}}^{jnouv} = \frac{S_r R_{moyi_{min}}^{jmax} + S_r R_{moyi_{min}+1}^{jmax}}{2}$. Finalement, les nouvelles erreurs associées aux fonctions d'égalisation couleur $\bar{a}(\lambda)$ seront :

$$\begin{aligned} \epsilon_{S_r R \bar{a}i_{nouv}}^{jnouv} &= \epsilon_{S_r R \bar{a}i_{min}}^{jmax} + \epsilon_{S_r R \bar{a}i_{min}+1}^{jmax} + \\ & \left(\int_{\lambda_{i_{min}}^{jmax}}^{\lambda_{i_{min}+1}^{jmax}} \bar{a}(\lambda) d\lambda \right) (S_r R_{moyi_{min}}^{jmax} - S_r R_{moyi_{nouv}}^{jnouv}) + \\ & \left(\int_{\lambda_{i_{min}+1}^{jmax}}^{\lambda_{i_{min}+2}^{jmax}} \bar{a}(\lambda) d\lambda \right) (S_r R_{moyi_{min}+1}^{jmax} - S_r R_{moyi_{nouv}}^{jnouv}) \end{aligned}$$

Après cette étape de fusion, l'erreur totale est à nouveau estimée afin de déterminer dans quel cas on se trouve.

4.4.4 Transformation en valeurs de tristimulus XYZ

A la fin de l'étape de rendu spectral, pour chaque pixel, le spectre $S_r(\lambda)$ calculé apparaît sous la forme d'une liste d'intervalles. A chacun d'entre eux est associée une valeur moyenne $S_{r_{moyi}}^j$. Or le passage en coordonnées XYZ se ramène à intégrer le spectre en le pondérant par les fonctions d'égalisation couleur. Comme on se trouve dans le cas très simple d'une fonction en escalier, les intégrations peuvent s'effectuer facilement en multipliant $S_{r_{moyi}}^j$ par la valeur sommée des fonctions d'égalisation couleur sur l'intervalle correspondant. Ces valeurs ont été calculées lors du pré-traitement.

Les valeurs de tristimulus XYZ sont donc obtenues comme suit :

$$A = \sum_{intervalles} S_{r_{moyi}}^j \bar{a}_{moyi}^j$$

4.4.5 Rappel de l'algorithme

En résumé, l'algorithme adaptatif de représentation des données spectrales peut s'écrire comme suit :

```

/* Nous supposons que la base de données est construite sous forme d'arbres binaires associés
au spectre de la source de lumière, aux réflectances et aux fonctions d'égalisation couleur */
Initialisation (Arbre_Binaire_Spectre,  $S_s$ ) ;
/*  $S_s$  est une liste d'intervalles contenant les informations suivantes :  $S_{smoy}$ ,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  */
Créer_Vide (Liste_Réflexions_Successives) ;
/* Cette liste est nécessaire pour les opérations de raffinement */
 $S_r = S_s$  ;
Tant_Que ( luminance_Énergétique < seuil)
/* Ce test pourrait être remplacé par un test de nature psycho-visuel portant sur la luminance
visuelle */
{
    Produit_Spectre_Réflectance ( $S_r$ , Arbre_Binaire_Réflectance,  $S_r R$ ) ;
    Ajoute (Arbre_Binaire_Réflectance, Liste_Réflexions_Successives) ;
    Calcul_Erreur_Totale ( $S_r R, \epsilon_t$ ) ;
    Tant_Que (( $\epsilon_t > \epsilon_{max}$ ) ou ( $\epsilon_t < \epsilon_{min}$ ))
    {
        Si ( $\epsilon_t > \epsilon_{max}$ ) Alors Raffinement ( $S_r R$ , Liste_Réflexions_Successives) ;
        Sinon Fusion ( $S_r R$ ) ;
        Mise_A_Jour_Erreur_Totale ( $S_r R, \epsilon_t$ ) ;
    }
     $S_r = S_r R$  ;
}
Calcul_Composantes_XYZ ( $S_r, XYZ\_Couleur$ ) ;

```

4.4.6 Implémentation pratique de la méthode

Jean Claude Iehl, lors de son stage de DEA, a été chargé de l'intégration de cette méthode dans le logiciel de lancer de rayon utilisé au laboratoire LISSE, et développé par Marc Roelens ([Roe93]). Dans son rapport de stage (voir [Ieh97]), il a proposé un certain nombre d'améliorations algorithmiques très intéressantes.

Tout d'abord signalons que l'on peut travailler avec uniquement le carré des erreurs totales estimées. La contrainte $\epsilon_{min} \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{max}$, est équivalente à: $\epsilon_{min}^2 \leq \epsilon_t^2 \leq \epsilon_{max}^2$. On peut donc se passer des évaluations coûteuses de racines carrées.

Après chaque réflexion, il est très utile de stocker les trois erreurs $\sum_{intervalles} \epsilon_{S_r R \bar{a} i}^j$. Si on doit modifier la représentation du spectre, il suffit alors de mettre à jour ces trois sommes. Ainsi, lorsqu'un intervalle est subdivisé, il faut soustraire ses trois erreurs colorimétriques: $\epsilon_{S_r R \bar{a} i}^j$, et rajouter celles de ses deux fils. Inversement, lors d'une fusion, on enlève celles des deux intervalles concernés, pour rajouter celles du nouvel intervalle les remplaçant. La mise à jour de l'erreur totale ne nécessite plus que deux additions et trois multiplications.

Lors d'une étape de raffinement, il faut tout d'abord chercher quel est l'intervalle pour lequel l'erreur commise est la plus importante. Au lieu de parcourir l'ensemble de la représentation à chaque fois, il est bien plus intéressant de maintenir une liste triée par erreur décroissante. L'intervalle à subdiviser se trouve alors forcément en tête.

Remarquons enfin que, si nécessaire, la méthode présentée peut être appliquée pour des domaines du visible plus larges que [380, 700nm]. Si on conserve un pas d'échantillonnage de 5nm, cela conduit à un nombre d'échantillons supérieur à 64. L'aspect multirésolution peut être maintenu en découpant chaque intervalle en deux-sous intervalles de longueurs non plus forcément identiques. Il faut simplement veiller à ce que les feuilles des arbres binaires construits correspondent aux échantillons initiaux¹³.

4.4.7 Quelques exemples

La figure 4.11 montre les approximations obtenues pour quelques fonctions spectrales. Les valeurs pour l'intervalle de tolérance ont été fixées à: $\epsilon_{max} = 2.10^{-3}$ et $\epsilon_{min} = 5.10^{-4}$.

La première figure concerne le spectre de la source D6500. Il faut 7 valeurs moyennes pour bien l'approximer. L'erreur XYZ obtenue est de 0.0013, et l'erreur couleur correspondante dans l'espace CIELUV est de 0.33. Comme on peut le voir, il ne s'agit pas d'une approximation de la fonction au sens des moindres carrés, mais au sens d'une erreur colorimétrique. Ainsi, comme les fonctions \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} sont quasi-nulles sur les bords du domaine visible, la fonction spectrale y est approchée de manière bien moins précise qu'au centre. En fait, la notion sous-jacente à cette remarque est celle du métamérisme.

La deuxième figure concerne le spectre de la source F2. Il faut 11 valeurs moyennes

13. Une autre solution consiste à utiliser un arbre binaire comportant un nombre de feuilles en 2^n , juste supérieur au nombre d'échantillons.

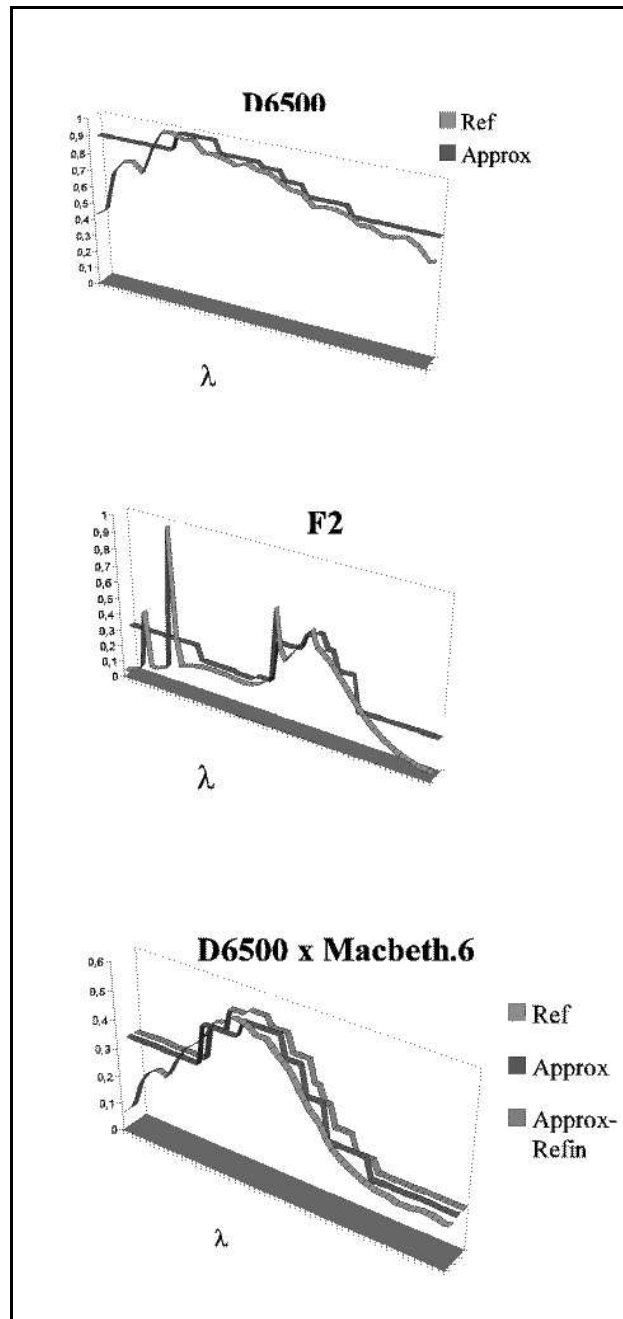


FIG. 4.11 – Exemples d'approximations de fonctions spectrales

pour bien l'approximer. L'erreur XYZ obtenue est de 0.0015, et l'erreur couleur correspondante dans l'espace CIELUV est de 0.27. Là encore, l'approximation se faisant au sens d'une erreur dans l'espace XYZ, la présence de pics d'émission sur les bords du domaine visible ne justifie pas une segmentation très précise. Notons que l'information n'est pas perdue. Si au cours de l'évaluation de ce spectre une nouvelle fois réfléchi, on s'aperçoit que la représentation n'est pas assez précise, l'opération d'affinement ira chercher dans la base de données les informations manquantes, ce qui permettra de détecter la présence éventuelle de pics devenus importants au sens d'une erreur colorimétrique. Notons que lors d'une opération d'affinement, le fait de rechercher l'intervalle d'erreur maximum conduit naturellement à isoler les pics.

La troisième figure concerne le spectre D6500 réfléchi par la sixième fonction de réflectance de l'échiquier de Macbeth. Initialement, comme pour le spectre de la source, on se contente d'utiliser 7 valeurs moyennes. Or l'erreur estimée dans l'espace XYZ est de 0.0060, ce qui est supérieur à ϵ_{max} . Il faut donc raffiner la représentation. Et, à l'issue de cette opération, on se retrouve avec 11 valeurs moyennes. L'erreur estimée est devenue égale à 0.0019. L'erreur couleur évaluée dans l'espace CIELUV, est elle passée de 2.99 à 0.91. Cet exemple fonctionne donc bien. Il faut noter, en toute honnêteté que l'erreur couleur après raffinement ne prend pas toujours des valeurs inférieures à 1.

4.4.8 Tests

4.4.8.1 Procédure de test

Pour nos tests, nous avons utilisé trois types de sources de lumière: C, D6500 et F2, les vingt-quatre réflectances issues de l'échiquier couleur de Macbeth ([CMD76]) et l'espace couleur Luv pour estimer la perceptibilité des erreurs commises. Les tests ont porté sur le spectre de la source de lumière, les réflexions primaires ($S_s R_i$, $1 \leq i \leq 24$), les réflexions secondaires ($S_s R_i R_j$, $1 \leq i, j \leq 24$) et les réflexions tertiaires ($S_s R_i R_j R_k$, $1 \leq i, j, k \leq 24$).

Dans chaque cas, nous avons déterminé le nombre moyen d'intervalles, et nous avons étudié le détail des différentes opérations requises.

Nous avons aussi comptabilisé le nombre d'erreurs de mesure, c'est à dire le nombre de cas où l'on a estimé à tort que l'erreur était à l'intérieur de $[\epsilon_{min}, \epsilon_{max}]$ (ces cas peuvent résulter de l'approximation faite pour le suivi des erreurs après un produit spectre-réflectance, voir paragraphe 4.4.3).

La Table 4.1 contient l'ensemble des résultats, avec encore une fois $\epsilon_{max} = 2.10^{-3}$ et $\epsilon_{min} = 5.10^{-4}$.

Remarque: "Aucune" signifie que ϵ_t s'est trouvé être directement dans l'intervalle d'erreur. "Fluctuation" désigne un cas où après avoir trouvé $\epsilon_t > \epsilon_{max}$, on a obtenu $\epsilon_t < \epsilon_{min}$ ou l'inverse.

Source	C	D6500	F2
Raffinement de S : Nombre d'intervalles	8	7	11
Erreur XYZ	0.0014	0.0013	0.0015
Erreur Luv	0.26	0.33	0.27
Réflexions primaires			
Nombre moyen d'intervalles	8.42	7.83	10.17
Ecart-type sur le nombre d'intervalles	1.63	1.79	1.91
Erreur Luv moyenne	0.91	0.88	0.84
Erreur Luv maximum	2.34	1.69	1.87
Ecart-type sur l'erreur Luv	0.53	0.41	0.49
OPERATIONS			
Aucune	41.7 %	25.00 %	50.00 %
Raffinement	45.8 %	58.33 %	12.50 %
Fusion	12.50 %	16.67 %	37.50 %
Fluctuation	0.0 %	0.0 %	0.00 %
Erreur de mesure	29.17 %	33.33 %	41.67 %
Réflexions secondaires			
Nombre moyen d'intervalles	7.15	6.91	7.33
Ecart-type sur le nombre d'intervalles	2.03	2.00	2.66
Erreur Luv moyenne	1.31	1.33	1.22
Erreur Luv maximum	5.95	6.62	6.27
Ecart-type sur l'erreur Luv	0.84	0.93	0.95
OPERATIONS			
Aucune	46.35 %	47.22 %	27.78 %
Raffinement	4.51 %	9.72 %	0.87 %
Fusion	46.70 %	39.76 %	67.71 %
Fluctuation	2.43 %	3.30 %	3.65 %
Erreurs de mesure	18.75 %	18.23 %	13.54 %
Réflexions tertiaires			
Nombre moyen d'intervalles	5.25	5.16	4.96
Ecart-type sur le nombre d'intervalles	1.94	1.88	1.99
Erreur Luv moyenne	1.53	1.57	1.51
Erreur Luv maximum	8.07	8.12	10.79
Ecart-type sur l'erreur Luv	1.07	1.15	1.28
OPERATIONS			
Aucune	26.92 %	29.72 %	22.08 %
Raffinement	0.52 %	1.08 %	0.05 %
Fusion	68.81 %	65.14 %	73.21 %
Fluctuation	3.75 %	4.06 %	4.67 %
Erreur de mesure	26.41 %	25.84 %	7.21 %

TAB. 4.1 – Résultats numériques des tests concernant la méthode adaptative

4.4.8.2 Analyse des résultats

Les cas où aucune correction (raffinement ou fusion) n'a été nécessaire ne sont pas les plus nombreux. Toutefois, on peut remarquer que quand le nombre d'inter-réflexions augmente, le nombre moyen d'intervalles décroît. En fait, on effectue de moins en moins de raffinements au fur et à mesure que le niveau d'inter-réflexions augmente. Ceci peut s'expliquer par le fait que le spectre initial de la source de lumière se trouve être filtré lors de chaque réflexion. Le niveau d'énergie devient donc de plus en plus faible, et le profil du spectre est de plus en plus plat.

On peut aussi s'apercevoir que l'erreur perceptuelle augmente au fur et à mesure des réflexions. Contenir l'erreur dans un intervalle $[\epsilon_{min}, \epsilon_{max}]$ de l'espace couleur XYZ n'est pas suffisant. Rappelons ici que les bornes de cet intervalle pour nos tests ont été choisies empiriquement. Elles semblent être un bon compromis pour conserver la distance évaluée dans l'espace CIELUV autour de 1.

Les erreurs de mesure ne sont pas trop nombreuses. Malgré l'hypothèse simplificatrice faite, la façon d'estimer l'erreur nous permet, en général, de prendre la bonne décision. Peu de fluctuations apparaissent. Cela nous est assuré par un ratio de ϵ_{max} sur ϵ_{min} d'environ 4. Enfin, le nombre moyen d'intervalles obtenu nous permet de passer à des composantes trichromatiques XYZ environ 10 fois plus vite que la méthode de référence.

Pour rendre compte de cette dernière remarque, on a réalisé un ultime test. On a comparé les temps d'exécution de la méthode de référence et de l'algorithme adaptatif. Pour cela, on a calculé l'ensemble des inter-réflexions tertiaires (soit 13 824 cas), sans tenir compte des fluctuations, et en passant au final en coordonnées XYZ . Les résultats sont les suivants :

	Calcul de référence	Calcul adaptatif
Pré-traitement	non	oui : 30 ms
Produits spectre-réflectance	580 ms	590 ms
Passage en coordonnées XYZ	240 ms	30 ms
Temps total	820 ms	620 ms

TAB. 4.2 – Temps de calculs comparés par rapport à la méthode de référence

4.4.9 Conclusion sur la méthode

La méthode proposée répond aux objectifs que l'on s'était initialement fixés. Son fonctionnement progressif est guidé par une estimation de l'erreur colorimétrique en cours de calcul. Les tests effectués ont montré la pertinence de l'algorithme. Globalement, pour trois niveaux de réflexions, son comportement est acceptable. Enfin, le dernier test réalisé montre un gain de temps par rapport à la méthode de référence.

Cependant, la méthode peut encore être améliorée. La section suivante présente

quelques axes de recherche que nous avons explorés dans ce but.

4.4.10 Quelques problèmes non résolus

Nous allons évoquer nos tentatives afin de mieux contrôler les erreurs commises. Puis, nous discuterons du problème de l'intégration de cette méthode dans un logiciel de rendu de type lancer de rayons.

4.4.10.1 Majoration de l'erreur résiduelle

Comme le montre la figure 4.12, les seuils fixés par l'utilisateur concernent une erreur estimée. Or il est évidemment tout à fait possible que l'erreur véritablement commise par rapport au calcul de référence, soit supérieure à ϵ_{max} ¹⁴.

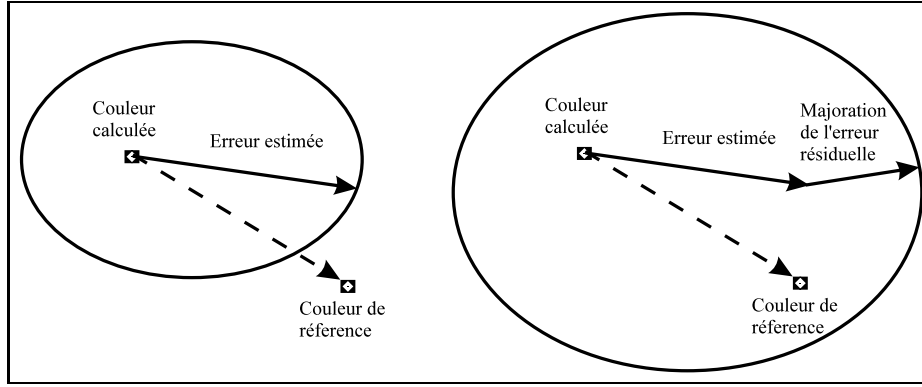


FIG. 4.12 – Utilisation de la majoration de l'erreur résiduelle

Cela provient du fait, signalé plus haut, que l'on néglige un terme résiduel. Celui-ci ne peut être évalué exactement, car cela reviendrait à effectuer autant de calculs que la méthode de référence. Borges dans [Bor91] a proposé une majoration utilisable pour ce genre de calcul.

Soient trois fonctions f , g et \bar{m} , continues sur un intervalle $[a, b]$. Supposons que l'on veuille évaluer:

$$Err(f, g) = \int_a^b f(x)g(x)\bar{m}(x) dx - \int_a^b f(x)\bar{m}(x) dx \int_a^b g(x)\bar{m}(x) dx$$

La formule suivante:

$$\|f\|_{\bar{m}}^2 = \int_a^b f^2(x)\bar{m}(x) dx - \left(\int_a^b f(x)\bar{m}(x) dx\right)^2$$

14. Le cas inverse où l'erreur réelle est inférieure à ϵ_{min} est bien moins grave, puisque même si on effectue des calculs inutiles, le résultat colorimétrique sera au moins satisfaisant.

définit une semi-norme sur l'espace des fonctions continues définies sur $[a, b]$. Et l'erreur $Err(f, g)$ peut donc être majorée comme suit:

$$|Err(f, g)| \leq \|f\|_{\bar{m}} \|g\|_{\bar{m}}$$

En identifiant f à S_r , un spectre incident, g à R , une fonction de réflectance, et \bar{m} à \bar{a} , une des trois fonctions colorimétriques, on obtient ainsi une majoration (au lieu d'une estimation), des trois erreurs $\epsilon_{S_r R \bar{a} i}^j$.

Nous allons en fait appliquer cette formule de majoration pour le terme résiduel. Celui-ci (voir 4.4.3) est: $K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j)(R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda$. Si on identifie f à $S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j$ et g à $R(\lambda) - R_{moyi}^j$, alors on peut écrire, pour tout intervalle $[\lambda_i^j, \lambda_{i+1}^j]$:

$$\begin{aligned} & |K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j)(R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\ & - K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda| \\ & \leq \sqrt{K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j)^2 \bar{a}(\lambda) d\lambda - K^2 \left(\int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{r_{moyi}}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \right)^2} \\ & \sqrt{K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (R(\lambda) - R_{moyi}^j)^2 \bar{a}(\lambda) d\lambda - K^2 \left(\int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (R(\lambda) - R_{moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \right)^2} \end{aligned}$$

En utilisant une notation avec des ϵ , on a alors:

$$|\epsilon_{S_r R \bar{a} r_{resid} i}^j - \epsilon_{S_r \bar{a} i}^j \epsilon_{R \bar{a} i}^j| \leq \sqrt{\epsilon_{S_r^2 \bar{a} i}^j - (\epsilon_{S_r \bar{a} i}^j)^2} \sqrt{\epsilon_{R^2 \bar{a} i}^j - (\epsilon_{R \bar{a} i}^j)^2}$$

Cette écriture nous fournit donc un encadrement pour l'erreur résiduelle. Et on peut alors notamment la majorer par:

$$\epsilon_{S_r R \bar{a} r_{resid} i}^j \leq \epsilon_{S_r \bar{a} i}^j \epsilon_{R \bar{a} i}^j + \sqrt{\epsilon_{S_r^2 \bar{a} i}^j - (\epsilon_{S_r \bar{a} i}^j)^2} \sqrt{\epsilon_{R^2 \bar{a} i}^j - (\epsilon_{R \bar{a} i}^j)^2}$$

Comme on le voit, que ce soit pour majorer directement les erreurs commises, ou simplement les erreurs résiduelles, il est nécessaire d'évaluer les erreurs quadratiques: $\epsilon_{S_r^2 \bar{a} i}^j$ et $\epsilon_{R^2 \bar{a} i}^j$. Cela contraint donc à les calculer lors de l'étape de pré-traitement, et à les rajouter dans les structures d'arbres binaires. En revanche, comme le montre la figure 4.12, on est assuré en rajoutant à l'erreur estimée, cette majoration de l'erreur résiduelle, que l'erreur vraie sera dans l'intervalle spécifié.

Les erreurs résiduelles pour des réflexions secondaires, en notant S_r le spectre incident, et R_1, R_2 les deux fonctions de réflectance, sont les suivantes:

$$\epsilon_{S_r R_1 R_2 \bar{a} r_{resid} i}^j =$$

$$\begin{aligned}
& S_{rmoyi}^j K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (R_1(\lambda) - R_{1moyi}^j)(R_2(\lambda) - R_{2moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\
& + R_{1moyi}^j K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j)(R_2(\lambda) - R_{2moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\
& + R_{2moyi}^j K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j)(R_1(\lambda) - R_{1moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda \\
& + K \int_{\lambda_i^j}^{\lambda_{i+1}^j} (S_r(\lambda) - S_{rmoyi}^j)(R_1(\lambda) - R_{1moyi}^j)(R_2(\lambda) - R_{2moyi}^j) \bar{a}(\lambda) d\lambda
\end{aligned}$$

Il y a donc inflation de termes. Les trois premiers peuvent être majorés de la même façon que précédemment. Mais le dernier nécessitera sans doute, après développement, l'évaluation lors du pré-traitement d'erreurs sur des termes de degré quatre.

Ce type de solution ne semble donc pas être utilisable en pratique. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas continué à le développer.

4.4.10.2 Utilisation directe de l'espace CIELAB

Jusqu'ici, nous avons évalué les erreurs couleurs dans l'espace CIELUV. On pourrait tout aussi bien employer CIELAB. L'idée est d'utiliser en cours de calcul, comme critère de décision, non plus une erreur estimée sur les composantes XYZ, mais une distance estimée dans un tel espace¹⁵. Le fait de contraindre l'erreur à demeurer dans un intervalle, revient dans l'espace XYZ à définir deux sphères concentriques autour du point que l'on tente d'évaluer. Il faudrait bien sûr travailler avec des ellipsoïdes, dont les paramètres dépendraient des coordonnées du point.

Le passage de composantes XYZ vers des coordonnées $L^*a^*b^*$ étant non-linéaire, cela rend impossible le contrôle local de la représentation des spectres. Ainsi, si la distance estimée devient supérieure au seuil de perceptibilité, on ne peut répondre à la question: quel intervalle doit-il être subdivisé? Il faut conserver le fonctionnement de l'algorithme tel quel, en travaillant sur des composantes XYZ, et en s'assurant dynamiquement que les erreurs couleurs correspondantes sont bien inférieures à 1.

La solution directe consistant à associer à chaque triplet XYZ estimé, des intervalles de tolérance assurant une erreur imperceptible, n'a pas abouti.

Le passage inverse de $L^*a^*b^*$ vers XYZ est le suivant:

$$\begin{aligned}
Y &= Y_n \left(\frac{L^* + 16}{116} \right)^3 \text{ si } L^* > 7996.248 \\
Y &= Y_n \frac{L^*}{903.3} \text{ sinon;} \\
X &= X_n \left(\frac{L^* + 16}{116} + \frac{a^*}{500} \right)^3 \text{ si } a^* > 500(7.787^{\frac{1}{3}} - \frac{L^* + 16}{116})
\end{aligned}$$

15. Comme il ne s'agirait en l'occurrence que d'une estimation, ce type de solution ne pourrait toujours pas nous assurer de ne commettre aucune erreur perceptible

$$\begin{aligned}
X &= \frac{X_n}{7.787} \left(\frac{L^* + 16}{116} + \frac{a^*}{500} \right) \text{ sinon;} \\
Z &= Z_n \left(\frac{L^* + 16}{116} - \frac{b^*}{200} \right)^3 \text{ si } b^* < 200 \left(-7.787^{\frac{1}{3}} + \frac{L^* + 16}{116} \right) \\
Z &= \frac{Z_n}{7.787} \left(\frac{L^* + 16}{116} - \frac{b^*}{200} \right) \text{ sinon;}
\end{aligned}$$

Toutes nos tentatives de développement limités, par la méthode de Taylor, de ces formules se sont avérées vaines, ou en tout cas inapplicables.

4.4.10.3 Intégration de la méthode dans un lancer de rayons

Comme toute méthode utilisant la projection des données spectrales sur une base de fonctions, son intégration dans un logiciel de rendu classique impose de nombreux changements.

Jean Claude Iehl, dans son rapport [Ieh97] a soulevé un certain nombres de difficultés inhérentes à cette entreprise. Certaines sont liées à la méthode adaptative, d'autres plus généralement, résident dans le fait même de simuler le comportement spectral de la lumière¹⁶.

Comme nous l'avons signalé tout au début de ce chapitre, un tel rendu nécessite de savoir effectuer trois types d'opérations. Parmi celles-ci, nous avons omis de parler de la sommation de deux spectres. Or, ceux-ci sont représentés, dans notre solution, par des listes d'intervalles. La sommation de deux spectres de partitions disjointes oblige donc à une opération de concaténation. Le risque est, lorsque l'on voudra rassembler en un point donné l'information spectrale, de procéder à un nombre de concaténations tel que le spectre sera finalement échantillonné aussi finement que si on avait utilisé la méthode de référence.

Plaçons nous dans le cadre d'un lancer de rayons classique. Premièrement, on détermine géométriquement quel est le point P1 de la scène vu dans une direction donnée. Puis, pour ce point, on calcule l'éclairement provenant directement de la source. Soit S_s le spectre d'émission de cette source, et R_1 la fonction de réflectance du matériau au point P1. On calcule donc le produit $S_s R_1$. Si ce matériau a un comportement spéculaire, on peut lancer un rayon de réflexion, qui supposons-le, intersecte un point P2. Soit R_2 la fonction de réflectance du matériau en ce point. On calcule $S_s R_2$, s'il est vu directement par la source. Et en revenant à P1, on obtient une énergie spectrale $S_s R_2 R_1$. Il faut donc sommer: $S_s R_1$ et $S_s R_2 R_1$. Telle que notre méthode a été exposée, il y a peu de chances pour que les deux spectres aient des partitions similaires. Or, si on remarque que spectralement, $S_s R_2 R_1 = S_s R_1 R_2$, cela permet de se sortir de ce problème. En effet, le partitionnement de $S_s R_1 R_2$ est en général très proche de celui de $S_s R_1$, car on n'a opéré, si cela est nécessaire, qu'un nombre fini de changements locaux (affinement ou fusion). La concaténation des deux ne devrait pas générer un nombre spectaculaire d'intervalles.

16. Les cas de réfractions, par exemple, peuvent amener à des situations extrêmement complexes.

Si on considère la présence de plusieurs types différents de sources dans la scène, le même genre de problème se pose. On peut par exemple, pour deux spectres de sources S_{s1} et S_{s2} , découper le domaine du visible en fonction du spectre $S_{s1} + S_{s2}$. Mais ce n'est pas très satisfaisant, car en un point de la scène, on devra plutôt évaluer des sommes du type: $\alpha S_{s1} + \beta S_{s2}$ (où α et β sont des coefficients liés principalement à la géométrie de la scène).

Plus généralement, nous avons proposé dans notre méthode des optimisations locales pour chaque niveau de réflexion. Dans une solution de type lancer de rayons, connaissant l'arbre des rayons, il faudra réussir à obtenir une représentation spectrale globalement satisfaisante.

Comme nous l'avons rappelé au début de ce chapitre, si on se place dans le cas général, l'interaction spectrale de la lumière avec la matière requiert pour sa simulation de connaître tout d'abord les directions d'incidence et de réflexion (ou réfraction). Cela peut se gérer en utilisant une FDRB (voir chapitre 1), comprenant 4 paramètres (2 angles pour l'incidence, et 2 pour la réflexion), plus la longueur d'onde. Or, une des modélisations proposées pour la FDRB repose sur l'utilisation d'ondelettes sphériques. Notre méthode s'appuie pour sa part sur une analyse multi-résolution des données spectrales. Il pourrait donc être utile de réunir ces deux modélisation en une seule, en utilisant une base de fonctions de type ondelettes en dimension 5.

Enfin, notons que la contrainte que nous nous sommes posée, ne commettre aucune erreur perceptible quel que soit le pixel de l'image considéré, est extrêmement forte. En utilisant, une notion de distance entre images, évaluable dynamiquement, lors d'un rendu progressif, on pourrait sans doute relâcher cette contrainte. Actuellement, il n'existe pas, à notre connaissance, de solutions à un tel problème. Nous présenterons, lors du chapitre 6, un algorithme de calcul de distance entre images couleurs, effectué a posteriori.

Chapitre 5

La perception de la couleur et ses applications

5.1 Introduction

La colorimétrie de base, telle qu'elle a été décrite dans le chapitre 3, s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses fortes, limitant son champ d'action. Finalement, elle rend compte de phénomènes ne mettant en jeu que les premières étapes de la vision humaine. Depuis plus d'un demi-siècle, la recherche dans le domaine de la couleur tend à étendre ce champ d'action, en essayant d'analyser des phénomènes perceptuels beaucoup plus complexes.

La mise au point d'espaces de couleurs uniformes, avec l'ensemble des formules de différences couleurs qu'ils induisent, a constitué (et constitue encore) une première voie de recherche. Mais de nombreux autres concepts ont vu le jour pour formaliser d'autres faits (adaptation en luminance, adaptation chromatique, effets de Bezold-Brücke, Helson-Judd, Helmholtz-Kohlrausch). Cela a donné lieu à beaucoup de travaux et d'expériences, menés presque toujours en tentant d'isoler le phénomène étudié des autres. Finalement, les connaissances accumulées en science de la couleur peuvent apparaître très atomisées. Rares sont les modèles complets de vision humaine (voir pour cela [Hun91]).

La réunion de ces connaissances disparates pourrait provenir de l'étude de la physiologie du système visuel humain. De nombreux progrès sont survenus en ce domaine avec l'accroissement de l'efficacité des moyens d'investigation. Or, comme finalement tous les phénomènes visuels connus reposent sur la physiologie, la voie de salut pourrait être celle-là.

Nous allons donc commencer ce chapitre par un rappel succinct concernant le système visuel humain. Puis, nous nous intéresserons aux phénomènes d'adaptation en luminance et d'adaptation chromatique. Enfin, nous décrirons comment ces connaissances peuvent être appliquées en synthèse d'images, afin de répondre au problème de la fidélité couleur.

5.2 Le système visuel humain

Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, l'essentiel des études portait sur le système optique de l'oeil et la rétine. Aujourd'hui, le système visuel humain est étudié beaucoup plus comme un tout, un ensemble physiologique.

On peut subdiviser le système visuel en trois grands sous-ensembles (voir la figure 5.1 extraite de [Sev96]). L'oeil et la rétine constituent un capteur. Le nerf optique, le chiasma et le corps genouillé latéral sont les composants de la transmission nerveuse. Signalons d'ores et déjà qu'à ce niveau-là, il n'y a pas simplement acheminement de l'information, mais aussi pré-traitement, mise en forme et compression du signal. Enfin, au niveau du cortex, l'image transmise est analysée et décodée.

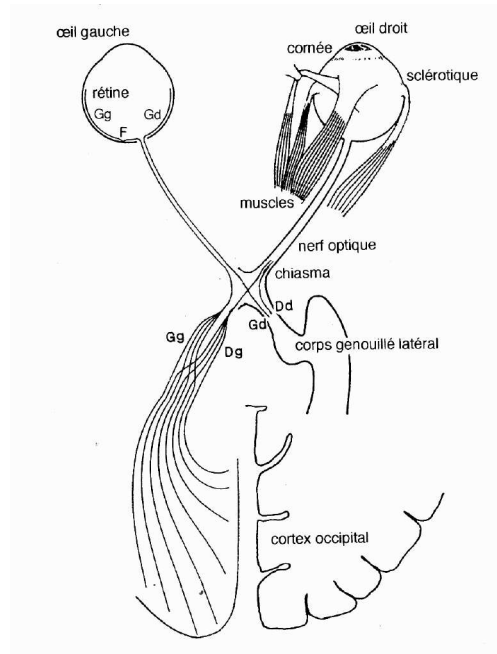


FIG. 5.1 – Schéma du système visuel humain

5.2.1 L'oeil

5.2.1.1 Anatomie de l'oeil

Le globe oculaire a un diamètre d'environ 2.5 cm (voir la figure 5.2 extraite de [Sev96]). Son pivotement s'effectue à l'aide de trois paires de muscles, et son irrigation est assurée par divers vaisseaux sanguins. On considère qu'en moyenne les deux yeux sont séparés d'environ 6 cm.

L'enveloppe de l'oeil est constitué par la *sclérotique*. Elle se transforme vers l'avant en une partie transparente plus bombée: la *cornée*. La sclérotique est doublée à l'intérieur par la *choroïde*, ainsi que la *rétine* qui est l'épanouissement du nerf optique.

La cavité intérieure de l'oeil contient outre des liquides biologiques salins en faible surpression, le *cristallin* et l'*iris*. Le *cristallin* est une lentille biologique qui forme sur la rétine une image inversée. En se déformant, il permet de plus l'accommodation sur des objets plus ou moins lointains. Placé juste devant lui, se trouve l'*iris*, au centre duquel est la *pupille*. Le diamètre de celle-ci peut varier de façon réflexe passant approximativement de 2 à 3 mm, lorsqu'elle est contractée, à 6 à 8 mm lorsqu'elle est la plus ouverte. Ce mécanisme est une première adaptation au niveau moyen des luminances perçues. Entre la cornée et le cristallin, le liquide contenu est l'*humeur aqueuse*, dont la composition est à peu près similaire à celle du plasma sanguin. La cavité postérieure au cristallin, contient l'*humeur vitrée*, masse demi-fluide contenant de l'albumine. La transparence des milieux oculaires, essentiellement de composition aqueuse, conduit à ne laisser passer que les rayonnements compris entre environ 370 et 1400 nm.

5.2.1.2 Le système optique de l'oeil

L'axe optique de l'oeil est l'axe du cristallin. Cependant, comme l'oeil n'est pas de révolution, quel que soit l'axe, ce n'est pas un système optique centré. De même, on ne peut appliquer l'hypothèse de Gauss, selon laquelle les rayons sont peu inclinés sur l'axe.

Cependant, on peut calculer les caractéristiques d'un oeil théorique, le plus proche possible de la réalité, en posant ces deux hypothèses simplificatrices. Les calculs montrent alors que sa puissance optique est d'environ 60 dioptries (due aux 2/3 à la cornée, et pour 1/3 au cristallin). L'accommodation permet d'augmenter cette puissance de 7 à 8 dioptries. Enfin, le foyer image est situé à environ 24 mm du pôle de la cornée.

Comme l'indice de réfraction de l'humeur vitrée varie avec la longueur d'onde (passant d'environ 1.345 à 400 nm, à 1.330 à 700 nm), l'oeil est sujet aux aberrations chromatiques. Ce phénomène diminue l'acuité visuelle.

Rappelons enfin, qu'un oeil normal est dit *emmétrope*. Un oeil dont le pouvoir convergent est trop fort, pour lequel l'image des points à l'infini se forme devant la rétine, est dit *myope*. Et inversement, un oeil dont le pouvoir convergent est trop faible, est dit *hypermétrope*.

5.2.2 La rétine

La rétine assure la réception des signaux lumineux, ainsi que leur transmission via le nerf optique. Son épaisseur est d'environ 250 μm , sauf dans la *fovea* (en latin: fosse) où elle s'amincit. Sa surface est de l'ordre de 1100 mm^2 .

La *fovea* est la zone de la rétine où l'acuité est maximale. Notons qu'elle est décalée d'environ 4 degrés par rapport à l'axe optique, qui n'est donc pas confondu avec l'axe visuel. Le diamètre de la *fovea* est d'environ 1500 μm , ce qui lui permet de couvrir

un champ visuel de 4 degrés. En son centre est la *foveola*, d'un diamètre de 400 μm environ, soit un champ visuel de 1.3 degrés. Autour de la *fovea*, dans une zone un peu plus grande, la rétine est colorée en jaune par le pigment maculaire. Cette coloration permet d'augmenter l'acuité visuelle en absorbant les rayonnements inférieurs à 510 nm. Enfin, à 10 degrés de l'axe optique, on trouve la tâche aveugle qui correspond à l'arrivée du nerf optique.

La rétine contient environ 150 millions de cellules nerveuses. Celles-ci peuvent être divisées en trois couches principales (voir la figure 5.3 extraite de [WS82]):

- La première contient les cellules photoréceptrices, soit environ 100 millions de cônes et 5 millions de batonnets. Ces cellules sont de forme très allongée, et disposées perpendiculairement à la paroi de la choroïde;
- La couche granuleuse contient des cellules bipolaires, mais aussi des cellules horizontales et amacrines (disposées transversalement);
- Enfin, la dernière couche est composée de cellules ganglionnaires, au nombre de 1.2 millions, qui, rassemblées, forment le nerf optique et s'étendent jusqu'au corps genouillé latéral.

Les cellules photoréceptrices se divisent en trois types de cônes (S,M,L) et en un seul type de battonnet. Les sensibilités maximales des cônes sont respectivement:

- S (Short) : 420 nm, détection dans le bleu;
- M (Medium) : 530 nm, détection dans le vert;
- L (Long) : 560 nm, détection dans le rouge.

Notons qu'au lieu de fonder la colorimétrie sur des expériences physiques, on aurait tout aussi bien pu utiliser ces primaires physiologiques (voir pour cela [VB91]). La sensibilité maximale des batonnets se situe à 495 nm.

Les cônes sont normalement actifs en vision diurne (photopique), pour des luminances dépassant quelques cd/m^2 . Ils sont responsables de la vision des couleurs. Les batonnets sont actifs en vision nocturne (scotopique), jusqu'à un niveau de luminance de quelques centaines de cd/m^2 . Ils permettent une vision monochromatique. Remarquons immédiatement que les domaines d'activité se chevauchent. Aussi, en vision intermédiaire (mésopique, ou "entre chien et loup"), cônes et batonnets fonctionnent simultanément. On peut parler dans ce cas, de vision "tétrachromatique". Le domaine mésopique est en fait assez difficile à appréhender quant à ses caractéristiques. Signalons simplement que d'un point de vue colorimétrique, on considère que la courbe d'efficacité visuelle se décale passant de $V'(\lambda)$ à $V(\lambda)$ (voir 2.3.1). C'est le *décalage de Purkinje*.

Les cellules photoréceptrices disposées globalement en mosaïque, se répartissent différemment sur la rétine selon leur type. Les cônes sont principalement situés dans la fovea et sa zone périphérique. Leur densité maximale est d'environ 150000/ mm^2 dans la foveola. Puis celle-ci diminue progressivement, tombant à 5000/ mm^2 à 20 degrés de l'axe

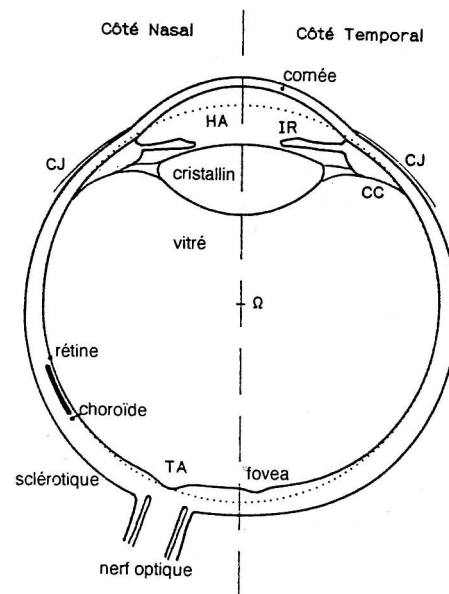


FIG. 5.2 – Schéma de l'œil humain

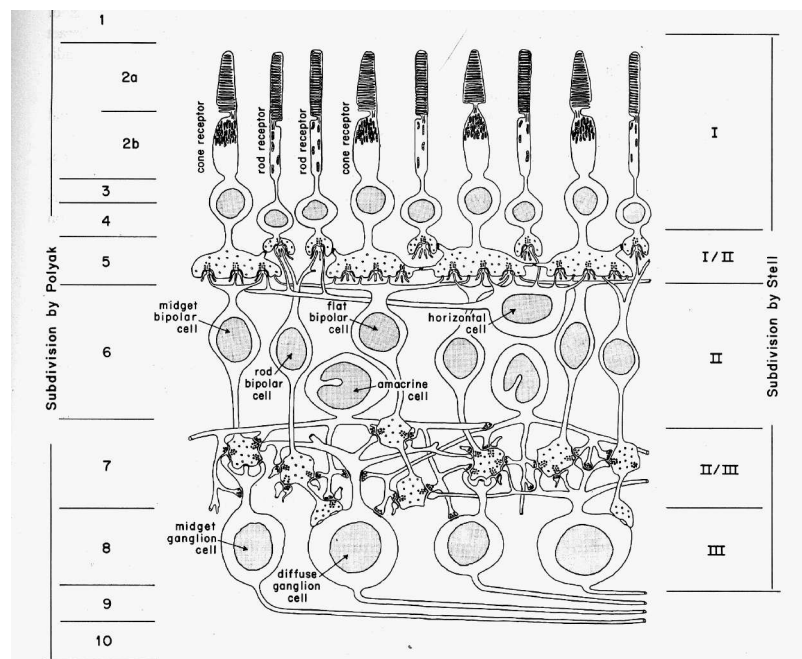


FIG. 5.3 – Structure schématique des connexions nerveuses dans la rétine

visuel. On peut considérer qu'au delà de 40 degrés, de par la quasi-absence de cônes, la vision devient monochromatique, et ne sert qu'à la détection des mouvements. Les batonnets, eux, ne sont pas présents dans la foveola. Puis leur densité augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum d'environ $160000/\text{mm}^2$ à 20 degrés de l'axe visuel. Enfin, cette densité décroît lentement en s'éloignant vers la périphérie (voir la figure 5.4 extraite de [Sev96]). Dans la zone de la tâche aveugle, il n'y a pas de cellules photoréceptrices.

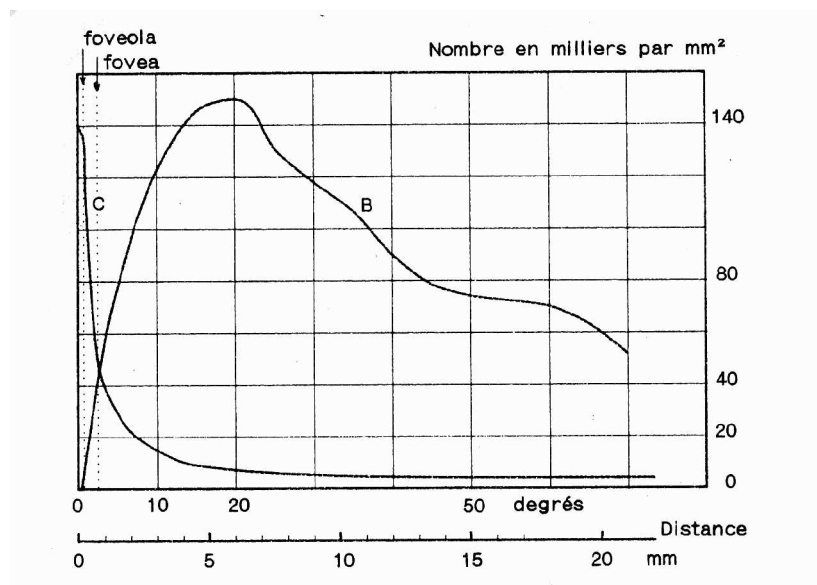


FIG. 5.4 – Répartition spatiale des photorécepteurs rétiniens

Les cônes ne sont pas tous en nombre égaux selon leur type. On peut considérer que pour un cône S, il y a 20 cônes M, et 40 L. Brièvement, cela peut s'expliquer par le fait que, comme les sensibilités maximales des cônes M et L sont assez proches et que l'oeil est sujet aux aberrations chromatiques, celui-ci "fait le point" sur cette bande de longueur d'onde. Donc, l'image parvenant à la rétine, des plus courtes longueurs d'onde, est défocalisée (plus floue, moins définie). Et il n'est pas nécessaire qu'il y ait un grand nombre de cônes S.

Le rôle des cellules photoréceptrices est de transformer une information lumineuse en impulsions nerveuses. Rappelons rapidement la photochimie nécessaire à ce processus. On observe assez facilement que la rétine de couleur pourpre tend à se décolorer en présence de lumière. La substance chimique mise en jeu chez l'homme, dans les batonnets, est la *rodhopsine*. Cette molécule a la faculté de changer de configuration (Cis ou Trans), sous l'action de la lumière. Ce processus chimique a pour effet de modifier le potentiel de la cellule réceptrice, générant une perturbation électrique qui se propage comme influx nerveux. Le retour à la configuration d'origine de la molécule se fait par

apport énergétique, après un temps de latence. Les cônes possèdent des substances chimiques analogues, dont la spécification détermine le type du cône. Notons enfin que tout photon absorbé par un même type de photorécepteur produit toujours le même résultat en terme d'impulsion nerveuse. C'est le principe d'univariance.

L'influx nerveux créé au niveau des cellules réceptrices est ensuite acheminé vers les couches neuronales inférieures. Ainsi, au centre de la rétine, à chaque cellule réceptrice correspond une bipolaire. Puis en s'éloignant vers la périphérie, une bipolaire est reliée typiquement à 20 à 70 batonnets, ou 5 à 6 cônes. De même, une cellule ganglionnaire est souvent reliée à plusieurs bipolaires. Au total, comme l'on passe d'environ 105 millions de cellules réceptrices à 1, 2 millions de cellules bipolaires, le premier traitement qu'effectue la rétine est celui d'une compression de l'information visuelle.

La réponse de chaque cellule ganglionnaire reflétant la stimulation d'une zone de la rétine, à chacune est associé un *champ récepteur*. Du fait des cellules transversales (horizontales et amacrines) fonctionnant en inhibition ou relaxation de l'influx transmis, ce champ est systématiquement divisé en deux zones concentriques antagonistes. Ce peut être un antagonisme spatial, soulignant la perception des contrastes et lignes de séparation entre diverses parties du champ visuel, ou un antagonisme spectral, rendant compte d'oppositions Rouge-Vert et Jaune-Bleu.

Le dernier rôle des cellules ganglionnaires est de transmettre un influx nerveux modulé en fréquence. Celle-ci varie généralement de 1 à environ 400 Hz.

5.2.3 Voies nerveuses et cortex

L'ensemble des cellules ganglionnaires forme le nerf optique. Rappelons que ces axones vont sans discontinuité de la rétine jusqu'au *corps genouillé latéral*. Au niveau du *chiasma*, les deux nerfs optiques se rassemblent, puis se partagent selon le champ optique qu'ils représentent. Ainsi, vers l'hémisphère droit du cerveau, sont envoyées les informations des deux demi-images gauches perçues par les yeux, et inversement. Cette particularité permet d'apprécier par mise en correspondance des demi-images, le relief et, peut-être, les fortes brillances.

Le corps genouillé latéral joue essentiellement un rôle de relais et d'amplification. Finalement, les connexions nerveuses se dirigent en majorité vers le cortex visuel de l'hémisphère cérébral leurs correspondant. Ce cortex visuel est une zone de taille assez importante, située en surface et à l'arrière des hémisphères.

Les traitements les plus complexes de l'information visuelle ont lieu à ce niveau là. Et, en relation avec d'autres sens (ouïe, toucher), et différents centres (mémoire, langage), la perception du monde s'organise. De là découle la prise de décision, et l'action toute entière de l'individu. Partant de l'étude de la vision humaine, on en vient au final à considérer le fonctionnement global du cerveau.

Comme on vient de le voir, la perception de la couleur met en jeux un grand nombre de composantes physiologiques. La colorimétrie de base, ne s'appuyant que sur le seul rôle des photorécepteurs, ne rend donc compte que de phénomènes assez simples. Par la

suite, nous allons décrire la modélisation de phénomènes visuels plus complexes (adaptation en luminance et adaptation chromatique), ce qui nous amènera vers une colorimétrie dite avancée.

5.3 Adaptation en luminance

5.3.1 Description du phénomène

Un être humain peut percevoir des luminances variant d'environ 10^{-6}cd/m^2 à 10^8cd/m^2 , cette échelle s'étendant du seuil de perception absolu jusqu'à l'éblouissement. Cependant, il est bien sûr impossible pour le système visuel humain de prendre en compte une telle dynamique en son entier. La stratégie adoptée est celle d'une adaptation au niveau moyen d'éclairement présent dans la scène visualisée. Au dessus d'un certain seuil L_{max} , relatif à ce niveau, les luminances présentes sont perçues comme éblouissantes. En dessous d'un autre seuil L_{min} , c'est une sensation d'obscurité, pour laquelle, les luminances ne peuvent être discriminées¹.

Cette adaptation n'est pas immédiate. Si on passe d'un endroit obscur à un endroit beaucoup plus éclairé, par exemple en sortant de l'intérieur d'un édifice par une belle après-midi d'été, le processus peut prendre quelques minutes. Inversement, si en plein jour, on rentre dans une salle de cinéma, l'adaptation est encore plus longue, et peut nécessiter de 15 à 20 minutes.

Physiologiquement, le processus repose sur quatre fondements essentiels:

1. la variation du diamètre de la pupille;
2. la présence de cônes et de batonnets, assurant chacun dans leur domaine, scotopique et photopique, la transformation de l'information lumineuse en influx nerveux;
3. la consommation (lors de l'adaptation à la lumière), et la restauration (lors de l'adaptation à l'obscurité) des substances photochimiques;
4. le contrôle, au niveau du réseau neuronal présent dans la rétine, de l'influx nerveux par réglage du gain (évitant autant que possible la saturation des récepteurs).

La notion importante rendant compte de cette adaptation est celle de *luminosité*. Sève, dans [Sev96], en donne la définition suivante. Elle est : "l'attribut caractérisant la sensation visuelle de lumière et son niveau plus ou moins important, indépendamment de ses autres aspects". *Cette grandeur n'est pas additive*.

1. Pour prendre une métaphore photographique, on pourrait parler de sur ou sous-exposition.

5.3.2 Stimulus lié à la luminosité

5.3.2.1 Notion de luminance lumineuse

Dans le chapitre 2, nous avons indiqué que la luminance lumineuse peut être évaluée, pour le domaine photopique, à l'aide de la fonction : $V(\lambda)$, et de la constante $K_m = 683$ lm/W. Or, ce n'est que dans un contexte précis (égalisation directe, et champ visuel de 2 degrés), que la luminance constitue une grandeur appropriée pour exprimer la valeur du stimulus de luminosité. Et ce n'est que dans ce cas là que deux rayonnements de composition spectrale quelconque sont également lumineux lorsque leur luminance est la même.

Notons immédiatement que cette fonction $V(\lambda)$, adoptée en 1924, ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté des spécialistes de la couleur.

Ainsi, on a su très tôt que ses valeurs étaient trop faibles au dessous de 460 nm. Judd, en 1951, proposa une correction. Et, en 1987, la CIE publia une fonction modifiée, notée $V_M(\lambda)$, tenant compte de la modification de Judd. Son emploi est recommandé pour les lumières de courtes longueurs d'onde, ou lorsque des lumières peu saturées sont produites à partir de sources à bandes étroites comme dans certaines lampes modernes, ou avec des tubes vidéo. La CIE n'a pas proposé de nom pour la valeur obtenue avec cette fonction. Dans la photométrie courante, les différences sont peu notables. Aussi la CIE a conservé sans modification la définition de la luminance.

La fonction $\bar{y}_{10}(\lambda)$ obtenue pour un champ de 10 degrés et des égalisations par papillotement (voir chapitre 3), diffère, elle aussi de $V(\lambda)$. Son maximum se situe, par exemple, à 557 nm, au lieu de 555. Là encore, la valeur obtenue n'a jamais été considérée par la CIE comme fournissant une luminance visuelle.

A partir des mesures par comparaison hétérochrome directe, on peut aussi déduire pour toute lumière, en particulier monochromatique, un rapport entre la valeur de luminosité objective et l'évaluation énergétique. On peut donc évaluer diverses fonctions $V_B(\lambda)$ relatives à l'efficacité spectrale des divers rayonnements monochromatiques. Les résultats diffèrent suivant l'étendue du champ visuel.

Ces diverses fonctions sont représentées sur la figure 5.5, extraite de [Sev96].

Retenons que, la plupart du temps, l'utilisation de $V(\lambda)$ est satisfaisante (et de plus définie comme standard par la CIE). Cependant, pour les cas particuliers mentionnés plus haut (lumière de courte longueur d'onde, champ visuel supérieur à 2 degrés ou rayonnement monochromatique), l'emploi d'autres fonctions peut être utile.

5.3.2.2 Notion de luminance équivalente

Pour les lumières s'éloignant de la neutralité, on s'est aperçu que la luminance lumineuse, calculée avec les moyens exposés dans le paragraphe précédent, conduisait à une sous-estimation de la luminosité². Le phénomène sous-jacent à cette constatation est celui d'Helmholtz-Kohlrausch. Il est très notable pour les tons rouge, pourpre, violet,

2. La fonction $V_B(\lambda)$ n'est relative qu'aux rayonnements monochromatiques.

bleu, bleu-vert et plus modéré pour le vert. La saturation intervient elle aussi, sans que le fait soit toujours très net pour les jaunes et les orangés. Quoiqu'il en soit, ce phénomène réduit nettement l'intérêt de la luminance lumineuse.

Il faut donc recourir à une nouvelle notion, celle de luminance équivalente, que l'on notera L_{eq} . Elle est, selon Sève, pour une lumière quelconque : "la luminance Y d'une lumière neutre jugée avoir même luminosité dans des conditions spécifiées". Pour Bodmann, dans [Bod88], c'est cette notion que l'on devrait utiliser comme mesure du stimulus de luminosité d'un rayonnement.

Diverses formules tentent de relier Y à L_{eq} , en faisant intervenir les coordonnées de chromaticité (x,y) . On peut citer :

- La méthode OSA :
où : $Y_{eq} = KY$, avec $K = 1.8103 - 1.3744x - 2.5644y + 4.4934x^2 - 4.2760xy + 4.3034y^2$. Les courbes de valeur constante en K sont des ellipses. Elles ont toutes le même centre $x = 0.3859$ et $y = 0.4897$ dans le jaune, un rapport de grand axe sur petit axe de 0,59 avec le grand axe incliné dans le sens bleu-jaune presque à 45 degrés. Au centre de l'ellipse, K prend sa valeur minimale, environ 0,92. Et la valeur maximale, 2, correspond au rouge.
- La méthode de Ware et Cowan :
où : $Y_{eq} = 10^C L$, avec $C = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4$. Un tracé des lignes d'égale valeur du rapport K montre des courbes ovales, assez proches des précédentes (voir la figure 5.6, extraite de [Sev96]).

5.3.2.3 Domaine non-photopique

Tout ce dont nous venons de parler n'est relatif qu'au domaine photopique.

Rappelons qu'en vision nocturne, la luminance lumineuse peut être obtenue au moyen de la fonction $V'(\lambda)$ et de $K'_m = 1700 \text{ cd/m}^2$. Celle-ci est décalée, son maximum étant situé à 507 nm. La sensation de couleur est absente, et l'acuité visuelle réduite. Ces deux phénomènes sont liés au fait que les cônes sont inopérants dans ce domaine de vision. En revanche, la discrimination des niveaux de luminance est plus élevée qu'en vision diurne.

Le domaine intermédiaire, mésopique, est assez complexe à décrire. On n'y observe pas une transition continue de la perception, entre les domaines photopique et scotopique. Ainsi, si l'on parle de décalage de Purkinje, pour refléter le passage de V à V' , celui-ci ne peut être modélisé par une simple interpolation. En fait, dire qu'en ce domaine les quatre types de récepteurs sont actifs est un peu réducteur. Les batonnets, et surtout les cônes, suivant leur type, ne sont pas tous inhibés pour les mêmes niveaux de luminance énergétique (voir [PCV96] pour le développement d'une photométrie mésopique).

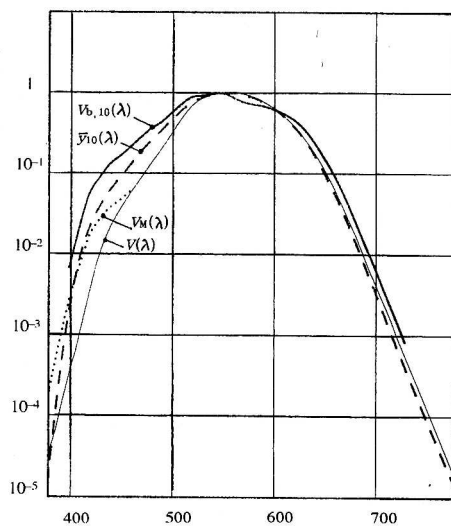
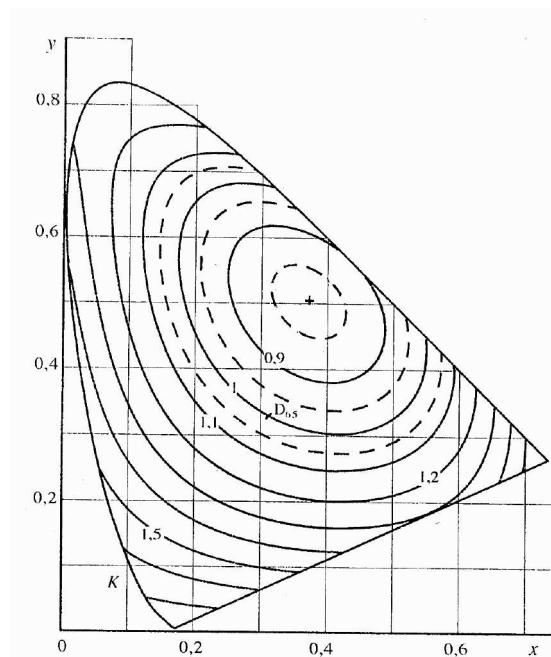
FIG. 5.5 – Fonctions $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $V_B(\lambda)$ 

FIG. 5.6 – Luminance équivalente en fonction de la chromaticité

5.3.3 Relation entre le stimulus et la luminosité

5.3.3.1 Seuil différentiel de luminance

A l'aide d'expériences, on essaie d'évaluer, pour une cible de luminance L , présentée devant un fond de luminance L_f , le domaine de variation possible de L , sans que l'on puisse distinguer la cible du fond. Les seuils évalués sont dit *liminaux*.

Au siècle précédent, Weber a postulé que le ratio de ce seuil sur la luminance du fond était constante, soit $\frac{\Delta L}{L_f} = cste$. En supposant que la luminosité perçue³ B est proportionnelle au ratio de Weber, la loi de Weber-Fechner stipule: $B = k_1 \frac{\Delta L}{L_f}$. Par intégration, on obtient:

$$B = k_2 \ln L_f + k_3$$

Cette loi, extrêmement célèbre, relie donc la luminosité à la luminance via une relation logarithmique. Notons cependant que son champ de validité semble être restreint à des luminances comprises entre quelques cd/m^2 et environ 500 cd/m^2 .

Plus récemment, au début des années 70, Blackwell a proposé la relation suivante:

$$\Delta L = 0.054(1.219 + L_f^{0.4})^{2.5} \quad (5.1)$$

A notre connaissance, il n'en a pas déduit de formule concernant la luminosité.

La figure 5.7 extraite de [Sev96](p181) indique la variation typique du seuil différentiel, en fonction de la luminance de fond.

5.3.3.2 Quelques lois reliant la luminance à la luminosité

Ces lois sont issues d'expériences où l'on présente de la même façon une cible de luminance L , devant un fond de luminance L_f . Simplement, la luminosité est obtenue par comparaison avec un stimulus de référence. L n'étant plus forcément proche de L_f , les seuils en question sont dit supra-liminaux.

Stevens et Stevens dans [SS63], proposent la relation:

$$B = 10^\beta L^\alpha \quad (5.2)$$

où: $\alpha = 0.4 \log_{10}(L_f) + 2.92$ et $\beta = -0.4(\log_{10}(L_f))^2 - 2.584 \log_{10}(L_f) + 2.0208$.

Bodmann, Haubner et Marsden ont donné la relation:

$$B = 23 \log_{10}(L) - 5.5 \log_{10}(L_f) - 1.6 \quad (5.3)$$

Enfin, Bodmann dans [Bod88], suggère, comme nous l'avons indiqué précédemment, d'utiliser la luminance équivalente comme stimulus de la luminosité. Il propose donc

3. B comme Brightness, luminosité en anglais.

d'employer la méthode de Ware et Cowan, puis d'utiliser la relation de Haubner suivante⁴:

$$B = C(\phi)L^n - B_0(L_f, \phi) \quad (5.4)$$

avec

$$B_0(L_f, \phi) = C(\phi)(S_0(\phi) + S_1(\phi)L_f^n)$$

où $n = 0.31$. Les constantes C , S_0 et S_1 dépendent de l'angle visuel ϕ correspondant à la taille de la cible. Leurs valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

ϕ_{min}	C	S_1	S_0
10	30.747	0.27308	0.39842
20	27.971	0.20132	0.35557
30	26.235	0.17975	0.31888
60	23.973	0.13133	0.26578
90	23.415	0.10868	0.25265
100	23.128	0.07473	0.24943
120	22.969	0.07186	0.24481

TAB. 5.1 – Valeurs des paramètres C , S_0 et S_1 en fonction de ϕ

La figure 5.8, extraite de l'article de Bodmann, indique les variations de la luminosité (notée ici H), en fonction de la luminance de la cible (L_T), pour plusieurs valeurs de la luminance de fond.

Cette relation de Haubner reprend et étend les résultats antérieurement obtenus (dont ceux de Bodmann, Haubner et Marsden et Stevens et Stevens).

5.3.4 Notion de clarté

La clarté, toujours selon Sève, est: “la luminosité d’une surface jugée par rapport à celle d’une surface idéale, parfaitement réfléchissante (donc assimilée au diffuseur parfait), éclairée de la même façon”. C’est une notion de luminosité relative appliquée à un objet. Pour un illuminant donné, elle varie de 0 à 100.

De même que pour la luminosité, la clarté peut être reliée à la luminance (ou à la luminance équivalente) d’une cible, présenté devant un fond, au moyen de lois.

La plus connue d’entre elles est la formule donnée par la CIE en 1976, soit:

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

Cette relation est donnée pour des surfaces observées sur un fond allant du blanc au gris moyen, pour un observateur adapté à la vision photopique, et dans un domaine d’adaptation qui ne s’écarte pas trop de la lumière moyenne du jour.

4. Comme l’expérience sous-jacente à ces résultats consiste à présenter une cible colorée devant un fond achromatique, L est une luminance équivalente, et L_f une luminance.

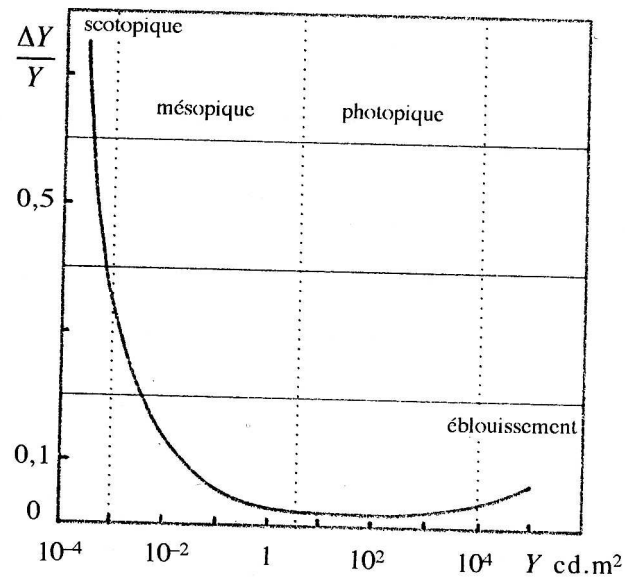


FIG. 5.7 – Seuil différentiel de luminance en fonction de la luminance de fond

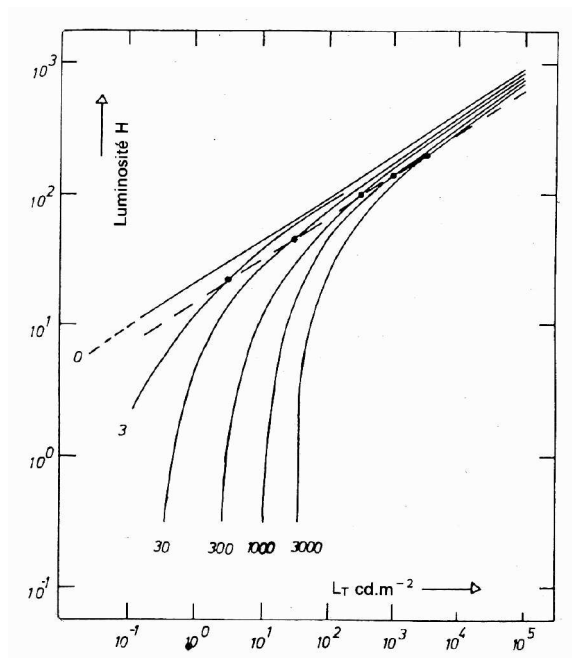


FIG. 5.8 – La luminosité de Haubner

Comme nous le verrons au chapitre suivant, la clarté définie dans l'espace LLab, est une variante de cette formule.

On peut citer, enfin, pour mémoire, d'autres lois que l'on trouvera dans [Sev96].

- La clarté de Munsell;
- La clarté de Hunter, en racine carrée;
- La clarté DIN, en logarithme;

5.4 Adaptation chromatique

5.4.1 Description du phénomène

Pour illustrer ce phénomène, on peut en donner un exemple. Lorsqu'étant dehors la nuit, on voit à travers une fenêtre un poste de télévision noir et blanc allumé dans un salon, celui-ci apparaît bleuâtre. Dans cette situation, les illuminants prévalants pour l'observateur sont, on peut l'imaginer, les lampes d'éclairage urbain. Celles-ci représentent le critère de blanc, et déterminent l'adaptation. Comme le poste de télévision est un objet petit et distant, celui-ci apparaît bleu. En revanche, si on se place dans le salon, l'écran est vu à une distance normale. Il domine le champ de vision, et semble afficher des images dans leur ton grisâtre habituel.

Ce phénomène reflète donc un changement global dans les chromaticités perçues, guidé par la source prédominante de la scène visualisée, que l'on a tendance à prendre comme référence pour le blanc.

5.4.2 La loi de Von Kries

La première formalisation de ce phénomène a été donnée par Von Kries, au début du siècle. Elle procure une bonne approximation.

Elle repose sur l'hypothèse suivante. La réponse visuelle est proportionnelle à la stimulation physique de chacun des trois récepteurs, et seuls les ratios des coefficients de proportionnalité changent avec l'adaptation.

Plus formellement, soient $X'Y'Z'$ les valeurs trichromatiques d'une couleur donnée pour un observateur adapté à un illuminant donné. Soient XYZ celles d'une couleur qui paraît identique à la première pour le même observateur adapté à un deuxième illuminant. On dit que ces deux couleurs se correspondent. Si on suppose que l'on dispose d'un système de trois primaires, on peut désigner ces couleurs par RGB et $R'G'B'$. La loi de Von Kries stipule, alors, qu'on peut trouver trois coefficients K_R , K_G et K_B , ne dépendant que des illuminants, tels que:

$$\begin{aligned} R' &= K_R R \\ G' &= K_G G \end{aligned}$$

$$B' = K_B B$$

Les valeurs de ces coefficients sont obtenues empiriquement. Supposons que l'on dispose, après expérience, d'un ensemble de couleurs se correspondant (comme sur la figure 5.9, extraite de [WS82]).

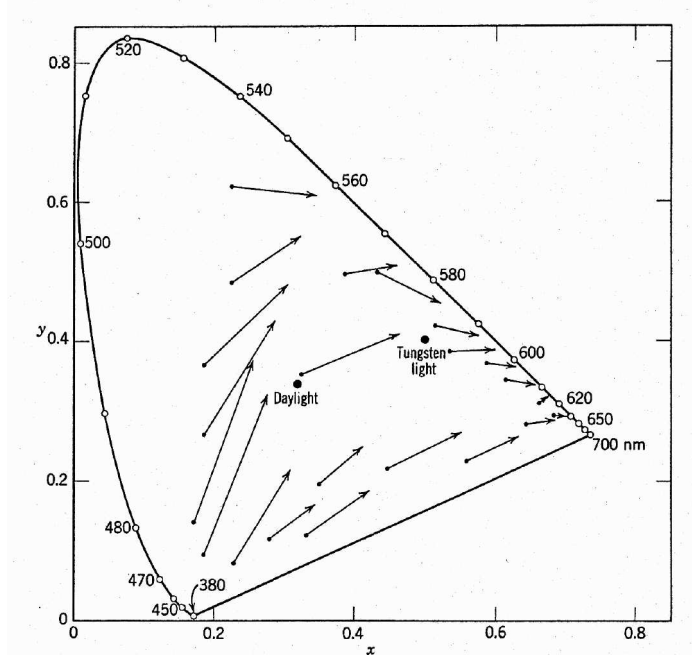


FIG. 5.9 – Ensemble de couleurs se correspondant pour un changement d'illuminant de la lumière du jour vers une lampe à incandescence

Alors, il s'agit de minimiser le rapport $\frac{\Delta S}{S}$, au sens des moindres carrés, avec:

$$\Delta S = \Delta X + \Delta Y + \Delta Z$$

$$\Delta X = X' - X'_c$$

$$\Delta Y = Y' - Y'_c$$

$$\Delta Z = Z' - Z'_c$$

où les valeurs XYZ sont issues des mesures, et les $X'_c Y'_c Z'_c$ sont celles calculées par la loi de Von Kries.

Les chromaticités des primaires Rouge et Bleue les plus utilisées sont celles des points P et T de Judd, c'est à dire: $(x_R = 0.747, y_R = 0.253)$ et $(x_B = 0.1785, y_B = 0)$. Selon les travaux de Mac Adam, la primaire Verte qui conviendrait le mieux⁵ aurait pour

5. Le mieux par rapport à l'objectif de la minimisation de la dépendance de la valeur au sens des moindres carrés de $\frac{\Delta S}{S}$ par rapport au choix des primaires.

coordonnées trichromatiques: $(x_G = 0.75, y_G = -1.75)$. Notons que ces primaires sont en partie en dehors du domaine visible.

5.4.3 Les lois non-linéaires

La loi de Von Kries n'étant qu'une approximation, de nombreux travaux ont vu le jour afin de proposer de nouvelles relations. Notons cependant que les nombreuses formules proposées au cours du siècle sont toutes basées sur les principes exposés au paragraphe précédent.

Dans [Ada85], on peut trouver la loi suivante:

$$\begin{aligned}\rho' &= K_R \rho \\ \gamma' &= K_G \gamma \\ \beta' &= K_B \beta\end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned}\rho &= a_1 + b_1 R^{p_1} \\ \gamma &= a_2 + b_2 G^{p_2} \\ \beta &= a_3 + b_3 B^{p_3} \\ \rho' &= a_4 + b_4 (R')^{p_4} \\ \gamma' &= a_5 + b_5 (G')^{p_5} \\ \beta' &= a_6 + b_6 (B')^{p_6}\end{aligned}$$

Les coefficients $p_1 - p_6$ dépendent des illuminants d'adaptation. Et les coefficients $a_1 - a_6$, $b_1 - b_6$ sont fonctions des coefficients p_i .

Le passage de XYZ vers RGB est le suivant:

$$\begin{aligned}R &= c(0.32X + 0.75Y - 0.07Z) \\ G &= c(-0.46X + 1.36Y - 0.1Z) \\ B &= cZ\end{aligned}$$

où c est une constante dont la valeur est telle que pour chaque groupe de données, la valeur maximum de RGB et $R'G'B'$ soit 80. Le passage de $R'G'B'$ vers $X'Y'Z'$ est le suivant:

$$\begin{aligned}X' &= 1.74R'/c - 0.96G'/c + 0.22B'/c \\ Y' &= 0.59R'/c + 0.41G'/c \\ Z' &= B'/c\end{aligned}$$

Les valeurs des coefficients K_R , K_G et K_B sont déterminées empiriquement de la même façon que précédemment.

On trouvera dans [WS82] (pages 429 à 451) l'exposé de nombreuses lois non linéaires, et leur comparaison.

En préambule au calcul des coordonnées LLab (voir chapitre 6), on procède à un calcul d'adaptation chromatique, afin de se ramener aux conditions d'éclairement de l'illuminant D65. Les formules utilisées seront présentées au chapitre suivant.

5.4.4 Constance couleur

La conséquence la plus notable de l'adaptation chromatique est que les objets semblent pratiquement avoir la même couleur, quel que soit l'illuminant. On appelle ce phénomène constance couleur. Par exemple, une feuille de papier apparaît blanche qu'elle soit éclairée par la lumière du jour, ou par une ampoule à filament de tungstène. Après un temps d'adaptation suffisant, elle apparaît encore blanche, même pour des éclairages de type lampe à vapeur de sodium. Bien sûr, pour des objets colorés, comme une peinture jaune ou un tissu bleu, la résistance au changement n'est pas aussi extrême.

Les lois d'adaptation chromatique, couplées à celles de distance chromatique (voir chapitre 3), permettent de prédire la constance couleur.

5.5 La fidélité couleur en synthèse d'images

Le problème est évoqué dans [RP98]

5.5.1 Présentation du problème

Le diagramme présent Figure 5.10 schématise l'objectif que l'on se fixe.

On met en correspondance le monde réel avec sa modélisation. Cela peut paraître présomptueux, sachant que toute modélisation n'est en fait qu'une simplification. On a donc noté sur le schéma que l'on supposait simplement une adéquation correcte. En posant comme hypothèse, de même, que le rendu spectral s'effectue sans introduction d'erreurs, les composantes XYZ théoriques sont identiques à celles du monde réel. Dans [MRC⁺86], les auteurs ont effectué la comparaison de la maquette d'une scène avec une image de synthèse calculée pour cette même scène. Les problèmes liés à la modélisation et au rendu ont été très nettement séparés de la visualisation. Dans un premier temps, les luminances spectrales calculées ont été comparées avec les mesures effectuées sur la maquette, à l'aide d'un spectrophotomètre. Puis, le réalisme de l'image a été testé auprès d'une population d'expérimentateurs humains. Pour raison de simplicité, comme nous ne nous intéressons, dans ce chapitre, qu'au problème de la visualisation des données, on identifiera la scène dont on a calculé le rendu avec la réalité.

On suppose donc la présence d'un observateur virtuel dans la scène, et celle d'un observateur réel devant le moniteur couleur où est présentée l'image de synthèse. *Le but théorique est de rendre égales leurs perceptions.*

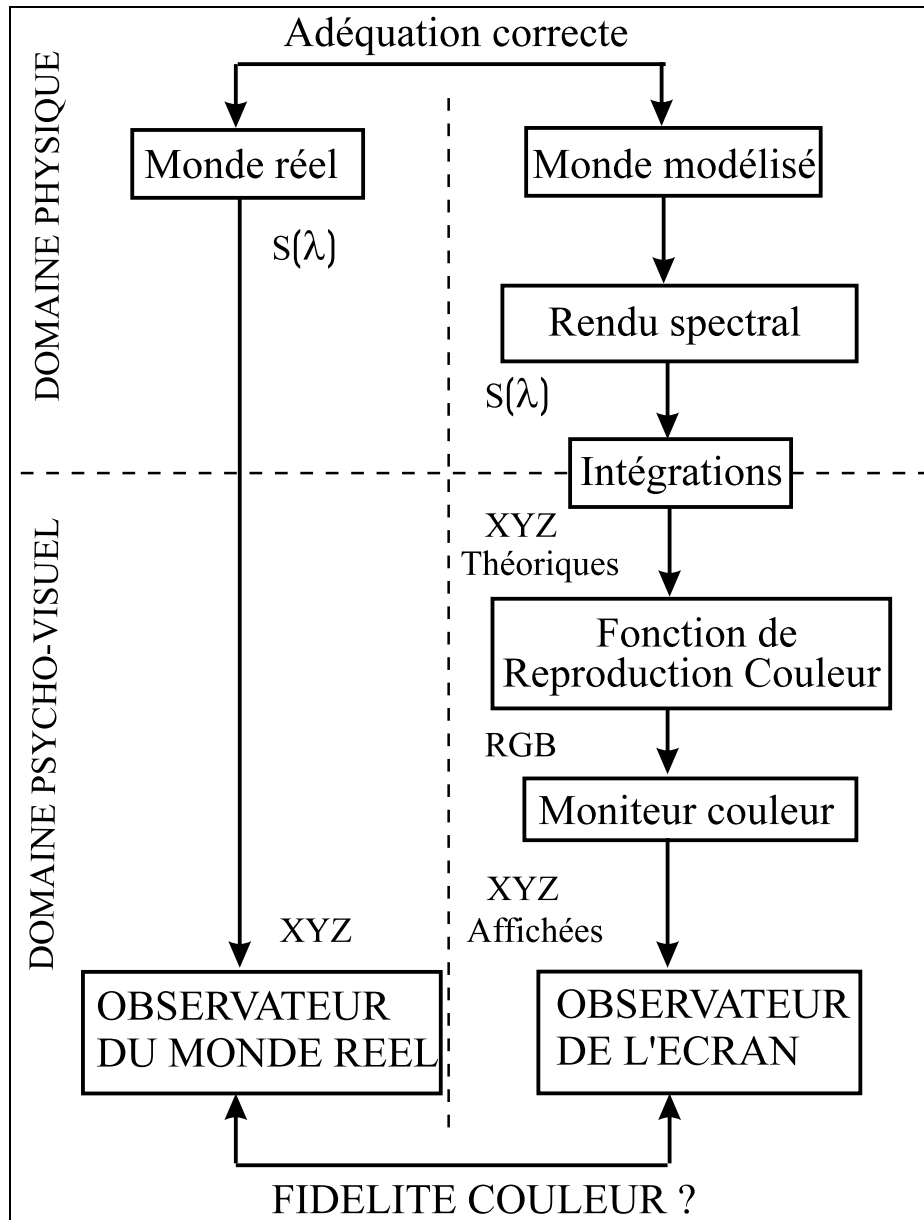


FIG. 5.10 – La visualisation en synthèse d'images

Le maillon essentiel dans cette figure est ce que nous avons nommée la Fonction de Reproduction Couleur (FRC). Si on adopte une représentation de type boîte noire, on a :

- en entrée, des composantes trichromatiques XYZ issues d'un logiciel de rendu spectral;
- en sortie, des coordonnées RGB (comprises entre 0 et 255) que l'on peut envoyer vers la mémoire d'image de l'ordinateur, pour affichage.

Moyennant les hypothèses posée au début de ce paragraphe (adéquation entre réalité et virtualité), le contenu de la boîte noire est représenté dans la figure 5.11

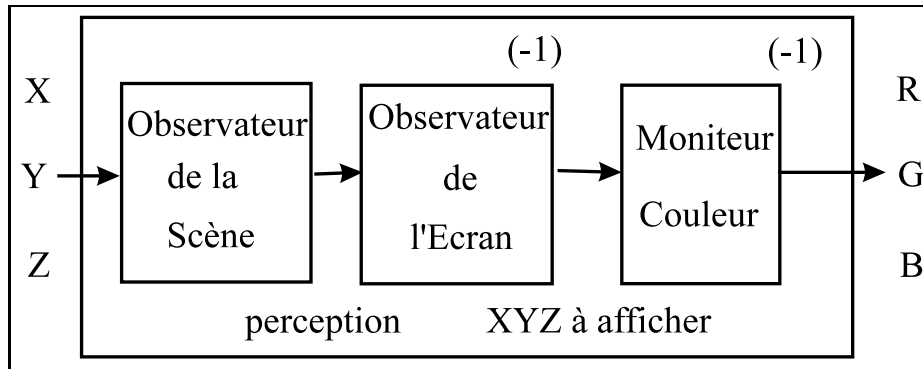


FIG. 5.11 – La Fonction de Reproduction des Couleurs

On a donc besoin d'un modèle d'observateur inversible⁶, et d'un modèle de moniteur couleur.

Comme à notre connaissance, aucune solution rigoureuse n'existe à l'heure actuelle pour des images couleurs, les FRC que nous allons présenter, valables uniquement pour des images de luminances, sont réduites à des *Fonctions de Reproduction des Tons*.

Dans ce qui suit, nous allons présenter des solutions connues permettant de passer de luminances théoriques à des luminances à visualiser. Puis nous évoquerons les problèmes liés à l'utilisation d'un moniteur couleur comme outil de visualisation.

5.5.2 Utilisation de modèles d'observateurs

5.5.2.1 Les méthodes connues

Ward dans [War94] a retenu comme perception le seuil différentiel de luminance. Il veut, pour l'observateur de la scène et l'observateur de l'écran, une relation linéaire

6. Notons que les composantes XYZ théoriques et les composantes XYZ à afficher diffèrent, car les deux observateurs ne sont pas placés dans les mêmes conditions.

entre les seuils, soit:

$$\Delta L_E = m \Delta L_S$$

En utilisant la relation 5.1 donnée par Blackwell, cela mène à:

$$m = \left(\frac{1.219 + L_{FE}^{0.4}}{1.219 + L_{FS}^{0.4}} \right)^{2.5}$$

les luminances étant dans le même rapport, on obtient donc:

$$L_E = \left(\frac{1.219 + L_{FE}^{0.4}}{1.219 + L_{FS}^{0.4}} \right)^{2.5} L_S \quad (5.5)$$

Pour calculer la luminance de fond de la scène L_{FS} , Ward suppose que l'observateur fixe son attention en un certain point. Si on pose comme hypothèse que la zone autour de ce point contribue de façon prépondérante à fixer le niveau d'adaptation de l'observateur, L_{FS} est simplement obtenue par une moyenne des luminances de la zone.

Le calcul de la luminance de fond de l'écran L_{FE} est plus délicat. En effet, on ne peut l'obtenir par une moyenne des luminances affichées puisque leur valeur dépend précisément de L_{FE} . Il faut donc lui attribuer arbitrairement une valeur. Si on note $L_{max-ecran}$, la luminance maximum que peut émettre le moniteur, en donnant à L_{FE} sa valeur moitié, soit $L_{max-ecran}/2$, on peut espérer que l'image visualisée aura une bonne dynamique.

Dans [JFG96], les auteurs utilisent la même relation 5.5, valable dans le domaine photopique. Puis, en s'appuyant sur de nouvelles valeurs expérimentales, ils établissent une formule analogue pour le scotopique. Enfin, par interpolation de ces deux lois, ils étendent leurs possibilités de simulation au mésopique. Signalons, de plus, que dans leur article, ils rendent compte de la diminution de l'acuité visuelle intervenant pour des scènes très sombres. Ils ont aussi géré la notion de temps, simulant l'adaptation progressive d'un observateur passant d'un fort niveau d'éclairement à l'obscurité, et inversement.

Tumblin et Rushmeier, dans [TR93], se sont intéressés à la notion de luminosité pour relier les luminances de la scène à celles de l'écran. Ils ont pour cela utilisé la relation 5.2, donnée par Stevens et Stevens. En supposant que les deux observateurs perçoivent des luminosités égales, on obtient:

$$L_E = L_S^{\frac{\alpha_S}{\alpha_E}} 10^{\frac{\beta_S - \beta_E}{\alpha_E}} \quad (5.6)$$

Les valeurs de α_S et β_S dépendent de la luminance de fond de la scène L_{FS} . Les auteurs suggèrent de la calculer comme moyenne de toutes les luminances de la scène, à laquelle ils rajoutent une constante, soit:

$$L_{FS} = \frac{1}{NbPixel} \sum_{Pixel} L_S + 0.84$$

Les valeurs de α_E et β_E dépendent, elles, de la luminance de fond de l'écran L_{FE} , qui est obtenue comme suit:

$$L_{FE} = \sqrt{L_{max-ecran} L_{min-ecran}}$$

D'Amico et Taugourdeau, dans leur rapport technique [DT93] se sont basés sur cette même égalisation des luminosités. Dans un but de comparaison, ils ont utilisé d'une part, la loi de Stevens et Stevens, et d'autre part celle de Bodmann, Haubner et Marsden. Pour cette dernière, en partant de la relation 5.3, on obtient:

$$L_E = \frac{L_{FE}^{\frac{5.5}{23}}}{L_{FS}} L_S \quad (5.7)$$

Les valeurs des luminances de fond ont été fixées de la façon suivante:

$$L_{FS} = \frac{1}{NbPixel} \sum_{Pixel} L_S$$

$$L_{FE} = L_{max-ecran}/10$$

En conclusion des tests, il s'est avéré que la formule basée sur la loi de Stevens et Stevens se comportait perceptuellement mieux que l'autre. Cependant, aucune des deux ne semblait capable de traiter correctement les scènes comportant une grande dynamique de luminance. Selon la valeur de L_{FS} , certaines parties de l'image sont sur (ou sous) exposées.

Les auteurs ont proposé une solution astucieuse à ce problème. D'après l'étude de l'histogramme des luminances, on peut fixer un seuil séparant les zones claires des zones sombres de l'image. Cela permet de déterminer deux luminances de fond, $L_{FSclair}$ et $L_{FSsombre}$. Puis, selon qu'un pixel appartient à une zone ou à une autre, on peut lui appliquer la relation correspondante⁷.

5.5.2.2 Exemples de réalisations

La figure 5.12 contient des images d'exemples.

On s'est basé pour cela sur une image de synthèse dont le rendu a été calculé, en valeurs RGB ⁸, par une méthode de Monte-Carlo. Johann Charlot lors d'un mini-projet de DEA a implémenté quelques unes des méthodes que nous venons de présenter.

La première image est obtenue par une simple interpolation linéaire des valeurs afin de se ramener dans l'intervalle $[0, 255]$.

Les deux images suivantes utilisent la loi de luminosité définie par Bodmann, Haubner et Marsden. Pour la première d'entre elles, une unique luminance de fond est calculée par une moyenne sur toute l'image. L'autre repose sur une segmentation en zones claires, et zones sombres.

7. En photographie, cela correspond à une opération de masquage lors du développement

8. Les triplets en question sont constitués de trois "floats" non nécessairement compris entre 0 et 255.

Les deux images en dessous utilisent la loi définie par Stevens et Stevens, en s'appuyant de la même façon respectivement sur une, puis deux luminances de fond.

Enfin la dernière illustre la segmentation obtenue. Les zones sombres sont en noir, et les claires en blanc.

5.5.2.3 Proposition d'une méthodologie

Les performances des méthodes que nous venons d'exposer pour relier les luminances de la scène aux luminances de l'écran reposent beaucoup, nous semble-t-il, sur le choix des luminances de fond. Il serait sans doute utile de permettre à l'utilisateur de modifier ces paramètres interactivement jusqu'à ce qu'il soit satisfait. Ou, si on désire absolument conserver un fonctionnement automatique, on pourrait utiliser préalablement à toute visualisation, un système de mires pour correctement paramétrer les fonctions.

Une extension souhaitable serait évidemment de permettre la visualisation d'images couleurs. Notons qu'il est hors de question d'utiliser les relations du paragraphe précédent, trois fois indépendamment pour les trois canaux Rouge, Vert et Bleu. Ce serait colorimétriquement incorrect.

Nous proposons, pour notre part, d'utiliser la loi que suggère Bodmann dans son article [Bod88], pour calculer des luminosités hétérochromatiques (par utilisation de la notion de luminance équivalente, et de la loi de Haubner)⁹. De plus, nous pensons qu'il serait nécessaire de rendre compte du phénomène d'adaptation chromatique. Il suffit, pour les deux observateurs, de déterminer la source de lumière prépondérante. Si l'observateur de l'écran est placé dans une salle obscure, son critère de blanc est évidemment donné par le moniteur. En revanche, pour l'observateur de la scène, ce peut être plus compliqué si, par exemple, il y a mélange de plusieurs types différents de sources. Il faut alors choisir, la plus proche ou la plus large en terme d'angle solide, ou bien celle qui émet le plus de puissance. Une fois ce choix effectué, on peut appliquer la loi de Von Kries, ou l'une de ses dérivées non linéaires. Remarquons immédiatement que prendre en compte à la fois l'adaptation en luminance et l'adaptation chromatique pose un problème mathématique. En effet, si on utilise les différentes lois les unes après les autres, on n'obtiendra pas les mêmes composantes XYZ en changeant leur ordre d'application. Peut être faudrait-il procéder par essai-erreur, et effectuer des compensations?

Pour finir ce paragraphe, nous allons évoquer quelques problèmes inhérents à l'objectif que l'on s'est fixé initialement: "rendre égales les sensations des deux observateurs".

Notons que ceux-ci sont placés dans des conditions très différentes. Si le champ de vision de l'observateur de la scène est entièrement occupé par celle-ci, c'est loin d'être le cas pour l'observateur de l'écran. En toute rigueur, l'objectif de la fidélité couleur en synthèse d'images, pour cette simple raison, ne peut être que théorique¹⁰. En pratique,

9. Notons que l'on utilise la loi de Haubner en dehors de son contexte (cible colorée devant un fond achromatique). La luminance de fond pourrait donc être calculée comme moyenne des luminances équivalentes.

10. A moins d'utiliser des casques de réalité virtuelle, ou des écrans de cinéma de type panoramique ou géode.

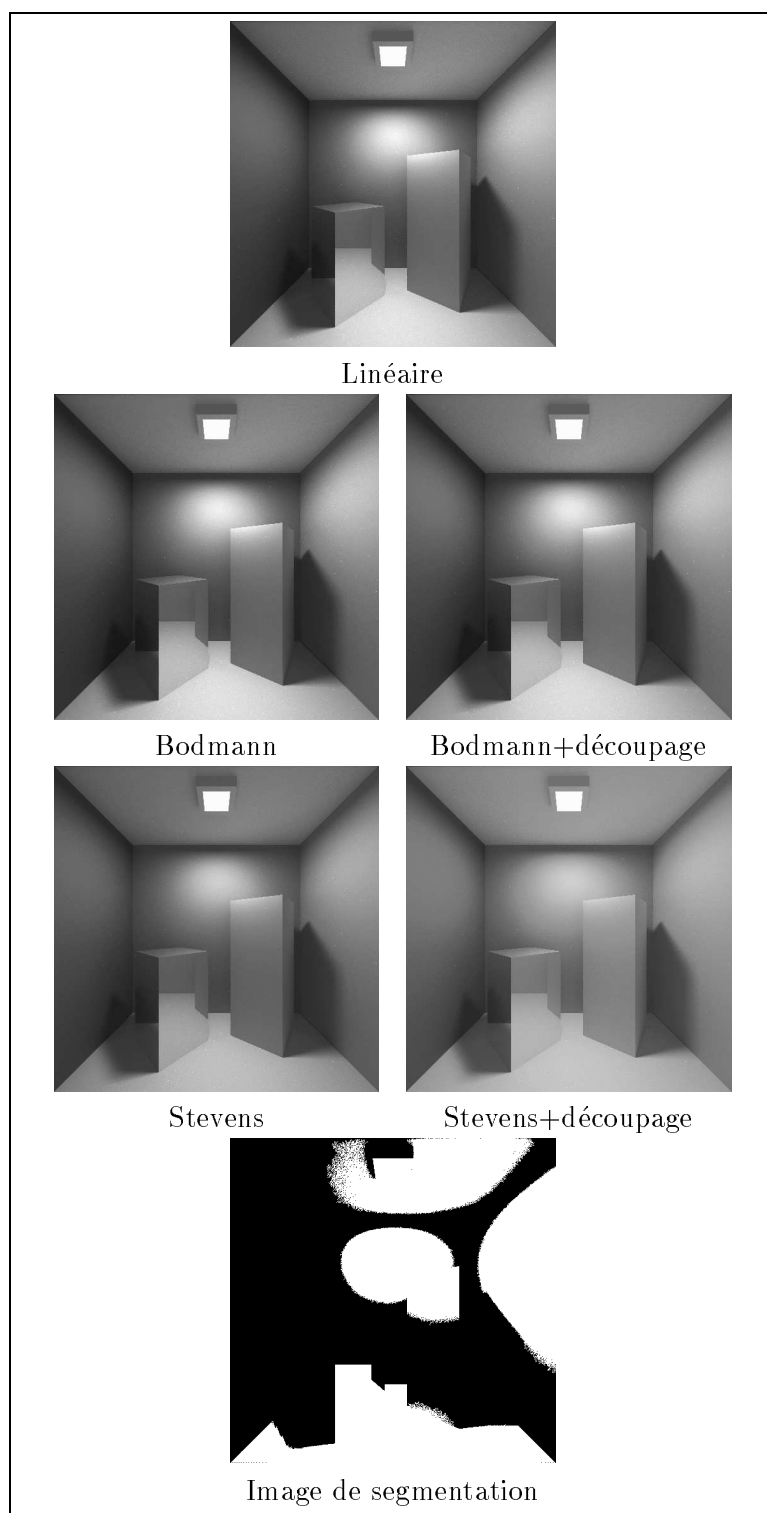


FIG. 5.12 – Quelques images obtenues par Fonction de Reproduction des Couleur

il faut donc faire extrêmement attention à l'environnement dans lequel l'observateur réel de l'écran est placé. Sa distance au moniteur et la taille de l'image doivent être mesurées. De la même façon, il faudrait pouvoir répondre aux questions suivantes:

- La salle est-elle placée dans l'obscurité?
- Sinon, quel type de lampe s'y trouve-t-il?
- Quelle est la réflectance de l'écran?
- Quelle est la couleur du mur du fond?
- Quelle est la couleur du bord du moniteur?
- Quelle est la couleur du bord des fenêtres informatiques?
- etc.

Notons enfin que l'observateur réel du moniteur doit juger de la fidélité couleur d'une image par rapport à une scène qu'il n'a jamais vue. Il doit donc se fier à des éléments extrêmement subjectifs comme sa mémoire, son imagination, voire sa culture.

5.5.3 Le moniteur couleur

Après avoir obtenu les composantes XYZ à afficher, il faut déterminer les coordonnées RGB qui leur correspondent. Nous allons décrire, dans ce qui suit, le processus de calibration d'un moniteur couleur, ainsi que les limitations techniques qu'il impose.

5.5.3.1 La calibration d'un moniteur

La calibration d'un moniteur consiste à déterminer la relation liant les coordonnées RGB aux composantes trichromatiques affichées en tout point de l'écran.

Si on n'a pas besoin d'une grande précision, on peut se fier aux données fournies par le fabricant. Mais tous les tubes cathodiques produits ne sont pas rigoureusement identiques, et le temps peut modifier leurs caractéristiques. Donc, en cas d'expérimentations poussées, il vaut mieux recourir à des mesures.

Bien sûr, la qualité de ces mesures dépend grandement de l'appareil utilisé. Cowan, dans [Cow83], propose une procédure rapide ne requérant qu'un luminance-mètre. Tout d'abord, il suggère de placer le moniteur dans des conditions identiques à celles où il sera lors de son utilisation. Cela signifie s'assurer de son positionnement spatial, de ses réglages (en "contrast" et "brightness"), et du gain relatif des trois canons. Puis il suggère d'utiliser les coordonnées de chromaticités, et le point blanc fournis par le fabricant.

La relation liant les composantes trichromatiques aux excitations des phosphores est un simple produit matriciel:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_R \\ E_G \\ E_B \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Puis, sachant que les voltages des canons sont reliés aux excitations par une relation non linéaire, les paramètres de celle-ci peuvent être calculés par ajustement à la courbe de mesure, afin de corriger cette non linéarité. C'est la *correction gamma*.

On peut utiliser différentes lois pour l'ajustement aux mesures:

- La plus connue est: $E_A(V_A) = (\frac{V_A}{V_{Amax}})^{\gamma_A}$ (où A = R, G ou B);
- Cowan propose: $\ln(E_A(V_A)) = A_A \ln(\frac{V_A}{V_{Amax}}) + B_A (\ln(\frac{V_A}{V_{Amax}}))^2$;
- On peut suggérer: $\ln(E_A(V_A)) = A_A \ln(\frac{V_A}{V_{Amax}}) + B_A (\ln(\frac{V_A}{V_{Amax}}))^2 + C_a$

Lors d'un mini-projet de DEA effectué l'an dernier, Stéphane Richez et Cédric Ro-
lez se sont basé sur cette dernière formule, pour calibrer les moniteurs du laboratoire. Ne disposant pas de luminance-mètre, les mesures ont été faite uniquement visuelle-
ment. Pour cela, il suffit d'afficher l'une à coté de l'autre deux images. La première
peut contenir par exemple une alternance régulière de pixels blancs et de pixels noirs.
La deuxième contient un niveau de gris uniforme. En ajustant ce niveau jusqu'à ce que
les deux images apparaissent identiques, on obtient un premier point de mesure. On
peut obtenir de la même façon deux autres points, en utilisant deux images où respec-
tivement un pixel sur quatre, et trois sur quatre sont blancs. Dès lors, on peut ajuster
les paramètres de la loi de non-linéarité. Pour un moniteur couleur, il suffit de répéter
trois fois cette même procédure, en utilisant des pixels rouges, verts et bleus au lieu de
blancs. Ce calibrage est simple à mettre en oeuvre, et rapide. En revanche, il est bien
sûr moins précis que si on utilise un appareil de mesure.

En résumé, les coordonnées RGB^{11} peuvent être déduites des valeurs XYZ par
inversion (éventuellement numérique) d'une loi de non-linéarité, et de la matrice citée
plus haut.

Brainard dans [Bra89] utilise un spectrophotomètre pour mesurer les émissions des
phosphores, avec suffisamment de précision pour prendre les raies d'émission en compte.
Avec cet instrument, une démarche plus rigoureuse que précédemment peut être suivie.
Premièrement, on émet des hypothèses concernant les performances du moniteur. Puis,
les paramètres adéquats sont mesurés. Enfin, on vérifie que les hypothèses sont bien
satisfaites.

Les hypothèses les plus fréquemment émises sont:

- la constance des phosphores: La puissance spectrale relative émise par un phos-
phore ne dépend pas de son excitation;

11. Ces coordonnées sont directement proportionnelles aux voltages des canons à électrons.

- l'indépendance des phosphores: L'excitation d'un phosphore ne dépend que de ses valeurs d'entrée, pas de celles de ses voisins;
- l'indépendance spatiale: La quantité de lumière émise en un endroit ne dépend que des valeurs d'entrée de cet endroit. C'est une notion d'indépendance entre pixels;
- l'inhomogénéité spatiale à la surface de l'écran, ce qui implique d'utiliser un terme correcteur $K(x_{pix}, y_{pix})$ pour la puissance absolue émise.

Si ces hypothèses sont satisfaites, il suffit de mesurer les chromaticités des phosphores, le point blanc de l'écran, les paramètres de la correction gamma et ceux de l'inhomogénéité spatiale. Ce dernier point, souvent oublié, ne semble pas négligeable. Brainard a mesuré des différences entre le centre et les bords de l'écran pouvant aller jusqu'à 20 % en puissance absolue. Cela peut s'expliquer par le fait que les faisceaux d'électrons parviennent obliquement sur les phosphores périphériques.

Finalement, Brainard a soulevé la question de la stabilité temporelle. Il a pour cela recalibré le même moniteur deux mois après l'expérience initiale. Et, heureusement, il n'a noté aucun changement significatif.

La calibration d'un moniteur, afin de permettre une visualisation précise des images, devrait toujours être faite avec soins, pour ne pas gâcher le travail effectué précédemment.

À l'issue de cette étape, on a déterminé les coordonnées *RGB* à envoyer à la mémoire vidéo. Mais, rien ne nous assure qu'elles soient comprises dans le champ des couleurs affichables par un moniteur¹².

5.5.3.2 Les limites d'un moniteur couleur

Il y a deux types différents de limitations. Tout d'abord, même lorsqu'il est connecté à une mémoire vidéo 24 bits (soit 16 millions de couleurs), un moniteur couleur ne couvre pas toutes les capacités colorimétriques humaines. En fait, les chromaticités des phosphores ne sont pas assez saturées pour fournir une telle possibilité. L'ensemble des chromaticités affichables par un moniteur couleur est contenu dans un triangle *RGB*. Cet ensemble est nommé *gamut* dans la littérature anglo-saxonne. Comme on peut le voir sur la figure 5.13, il est inclus dans l'ensemble des couleurs discernable par un être humain.

La deuxième limitation concerne les luminances. La plupart des moniteurs ne peuvent dépasser une valeur maximale d'environ 100 cd/m².

Si on adopte une vision en trois dimensions du problème, on peut même souligner que les deux limitations sont liées. En fait, les possibilités du moniteur sont orchestrées autour de son axe neutre (qui contient les coordonnées *RGB* de type *NNN*, où $0 \leq N \leq 255$). Cela implique que les couleurs les plus saturées (les plus éloignées de cet axe) ne sont pas les plus lumineuses. De même, les plus grandes (ou plus basses) luminances correspondent à des couleurs quasi-insaturées. La figure 5.14 illustre notre propos.

12. Elles peuvent ainsi être négatives ou dépasser 255.

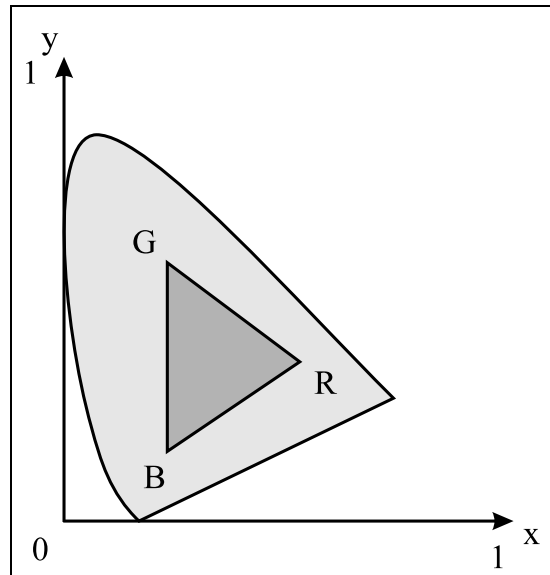


FIG. 5.13 – Chromaticités affichables par un moniteur couleur

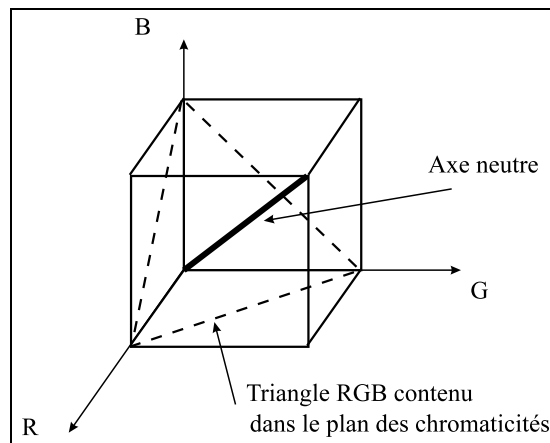


FIG. 5.14 – Lien entre couleurs et luminances pour un moniteur

Lorsque les coordonnées RGB obtenues au paragraphe précédent sont en dehors des possibilités du moniteur, deux cas peuvent survenir. Premièrement, le vecteur calculé peut avoir une direction qui n'intersecte pas le cube RGB (problème sur les chromaticités). Deuxièmement, sa norme peut être trop importante (problème en luminance). Bien sûr, ces deux cas peuvent intervenir en même temps.

Le problème est donc de ramener les coordonnées fautives à l'intérieur du cube RGB . Pour cela, il faut effectuer une opération de “mapping”. Remarquons que cela peut se faire soit dans “l'espace RGB ”, soit dans l'espace XYZ . En effet, l'ordre des opérations de passage de composantes XYZ vers des coordonnées RGB , et de mapping peut être inversé.

Il y a deux grandes méthodes pour procéder au mapping. La première consiste à *couper*, ce qui signifie conserver les coordonnées à l'intérieur du gamut inchangées, alors que l'on projette les autres sur sa frontière. La deuxième méthode consiste à employer une transformation globale telle qu'une translation, une rotation ou une mise à l'échelle de l'ensemble des coordonnées.

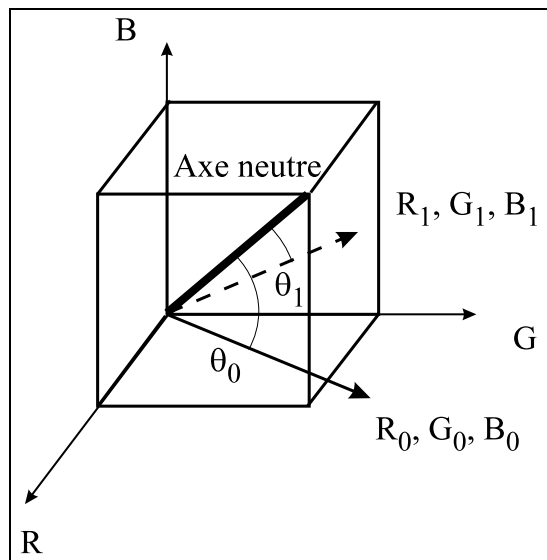


FIG. 5.15 – Décalage vers l'axe neutre

- En travaillant dans l'espace RGB

Le coupage peut se faire très facilement. Par exemple, les valeurs supérieures à 255 sont ramenées à 255, et les valeurs négatives deviennent nulles.

Smith, dans [Smi93], préfère définir une transformation globale. Il part d'un fait expérimental que l'on pourrait exprimer ainsi: “Les objets de fortes luminances apparaissent plus blancs, comparés à leur environnement, que leurs chromaticités ne le suggèreraient”.

La transformation proposée nécessite deux étapes. Premièrement, considérons le cube unité RGB . Soit θ_0 , l'angle entre l'axe neutre et un vecteur de coordonnées R_0, G_0, B_0 . Alors ce vecteur est décalé vers l'axe neutre de telle sorte que son nouvel angle soit:

$$\theta_1 = \theta_0 \left(1 - \left(\frac{Y}{\gamma Y_{max}}\right)^\beta\right)$$

Y_{max} est la luminance de l'objet le plus lumineux dans la scène, à l'exception de la source de lumière. Comme cet objet n'est pas nécessairement blanc, on a introduit un paramètre γ . La figure 5.15 illustre le procédé utilisé.

La deuxième étape consiste en la mise à l'échelle des nouvelles valeurs $R_1 G_1 B_1$, à l'aide des formules suivantes:

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 \left(\frac{Y}{Y_{max}}\right)^\alpha \\ G_2 &= G_1 \left(\frac{Y}{Y_{max}}\right)^\alpha \\ B_2 &= B_1 \left(\frac{Y}{Y_{max}}\right)^\alpha \end{aligned}$$

Après avoir mené des expériences perceptuelles, les meilleurs valeurs pour α , β et γ semblent être les suivantes: $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.75$ et $\gamma = 5.0$. Toutefois, ces valeurs doivent être employées avec précautions, car elles ne paraissent pas être utilisables pour des images comprenant une forte dynamique (par exemple, quand la source est visible);

- En travaillant dans l'espace XYZ

Stone, Cowan et Beatty dans [MSB88] ont proposé plusieurs méthodes pour procéder à des opérations de mapping dans l'espace XYZ . Le problème qui les intéressait était d'imprimer des images couleurs. Toutefois, leur approche peut s'appliquer aux moniteurs couleurs.

Tout d'abord, ils suggèrent d'utiliser diverses transformations, de telle sorte que les cinq règles suivantes soient observées par ordre d'importance:

1. Préserver l'axe neutre;
2. Maximiser le contraste en luminance;
3. Quelques couleurs peuvent rester en dehors du gamut;
4. Minimiser les décalages en teinte et saturation;
5. Si la saturation doit être modifiée, alors il vaut mieux l'augmenter.

Stone, Cowan et Beatty proposent trois transformations principales: une translation, une mise à l'échelle et une rotation autour de l'axe neutre. Leur combinaison peut s'exprimer de la façon suivante:

$$X_d = N_d + c d n (B_d - N_d) + f m e c R (X_i - N_i)$$

où, d signifie destination, i image, N noir et B blanc. X représente les composantes trichromatiques. R est la matrice de rotation, cdn le coefficient de décalage du noir et f_{mec} le facteur de mise à l'échelle du contraste.

On peut employer une dernière transformation dite “en ombrelle”. Celle-ci permet de globalement saturer ou désaturer l'ensemble des couleurs.

Un observateur peut dès lors ajuster interactivement les paramètres de ces transformations, en observant les cinq règles énoncées plus haut.

Après application des transformations, la majeure partie de l'ensemble initial se trouve à l'intérieur du gamut du moniteur, à l'exception de quelques unes d'entre elles: comme les reflets, celles qui sont très saturées ou celles qui sont proches du noir. Il est préférable de les garder en dehors du gamut, afin de conserver une bonne dynamique globale.

La dernière étape consiste donc à projeter ces couleurs sur les frontières du gamut. Pour cela, les auteurs proposent d'employer une projection perpendiculaire.

Actuellement, ce problème de mapping ne peut être considéré comme entièrement résolu. Par exemple, la notion de distance devient très importante pour les deux types de méthode (coupage et transformation globale). On pourrait donc employer des espaces plus appropriés comme CIELUV ou CIELAB.

Notons enfin, qu'après cette dernière étape, la fonction de reproduction couleur obtenue n'est plus objective. Du fait des contraintes technologiques, on ne peut que suggérer les sensations. Ainsi, par exemple, si l'observateur de la scène est ébloui, alors la luminance maximale du moniteur est affichée. On ne peut rien faire de mieux.

5.5.4 Conclusion et perspectives

Nous venons de présenter le problème de la fidélité couleur en synthèse d'image au sens d'observateurs humains. C'est un problème difficile car il fait appel à de nombreux domaines (comme la colorimétrie avancée et la connaissance des contraintes technologiques liées à l'outil de visualisation). Il est loin d'être résolu entièrement. Nous avons critiqué les méthodes existantes et proposé quelques pistes de recherche possibles.

Signalons qu'il existe un certain nombre d'approches connexes à la fidélité couleur telle que nous l'avons présentée dans ce chapitre. Puisque le maître-mot en notre domaine est la quête d'un meilleur photo-réalisme, on peut imaginer, au lieu de placer un observateur virtuel dans la scène, prendre une photographie de celle-ci. Il faut alors modéliser, d'une part, les processus photochimiques d'impression de la pellicule, puis d'autre part le développement sur papier, ou diapositive pour les films inversibles. On peut citer [GM97], pour une tentative récente (et en noir et blanc) pour ce genre de simulation.

De manière général, on peut imaginer placer n'importe quel type de récepteur dans la scène, comme une caméra video CCD, un être humain daltonien, ou même un animal (voir [Col97], pour des abeilles), du moment qu'on en a un modèle.

Notons que ces approches, même en l'absence d'être humain, restent difficiles.

Une toute autre voie de recherche tend vers un réalisme pictural. En utilisant les connaissances (souvent empiriques) accumulées en peinture, on peut suggérer beaucoup plus que le média ne pourrait le laisser penser de prime abord. On peut citer [SSZG95] pour la reproduction de halos lumineux, [TO97] pour une réduction de la dynamique des luminances à la façon des peintres, et [MKT⁺97] pour l'obtention de figures crayonnées.

Chapitre 6

Définition d'une distance perceptuelle en synthèse d'images couleurs

6.1 Introduction

Le problème de la définition d'une distance entre images en couleur est fondamental dans le domaine de l'image numérique en général. Sa résolution permettrait de donner une réponse quantifiée à la question: "A quel point deux images sont-elles semblables ou différentes".

Or, depuis longtemps, en traitement et analyse d'images, ce problème a été abordé. La nécessité de mettre au point un tel outil s'est imposée naturellement avec l'apparition d'algorithmes de compression, ou de quantification couleur.

En synthèse d'images, ce même besoin crucial existe, par exemple pour mesurer l'efficacité relative des algorithmes de rendu, ou pour déterminer l'importance des divers paramètres de ces algorithmes.

Simplement, ces deux domaines, s'ils ont de véritables points de convergence, n'ont pas réellement la même approche de l'image, et ne possèdent en particulier pas des critères d'appréciation comparables. Une simple transposition des méthodes d'un domaine vers l'autre semble donc inappropriée.

De plus, les outils issus du domaine du traitement et de l'analyse n'autorisent de comparaison qu'entre images de type RVB dont la provenance est souvent inconnue. En synthèse d'images, on dispose de connaissances supplémentaires. Ainsi, la géométrie de la scène est parfaitement connue, et, l'image calculée peut être obtenue en composantes XYZ, donc sans perte de dynamique sur les luminance ou les chromaticités.

Il nous semble donc utile d'élaborer une métrique propre à notre domaine.

Nous allons, par la suite, rappeler brièvement les travaux antérieurs, puis nous exposerons notre méthode. Suivront quelques tests et résultats. Puis, cette méthode n'étant

qu'une première étape vers l'objectif que l'on s'est fixé, nous discuterons de ses évolutions souhaitables à l'avenir.

6.2 Travaux antérieurs

Dans le domaine du traitement et de l'analyse d'images, une littérature très abondante se rapporte au problème de l'évaluation d'une distance entre images. Comme l'algorithme que nous allons présenter a bénéficié d'une étroite collaboration avec l'Institut d'Ingénierie de la Vision, basé à Saint Etienne, on pourra consulter avec profit les travaux d'Alain Trémeau et d'Eric Dinet en ce domaine ([TPDL95], [TDF96] et [DT96]).

En synthèse d'image, si la définition d'une distance s'est avérée assez rapidement utile, peu de travaux ont porté sur ce problème. Dans [MRC⁺86], comme nous l'avons signalé au chapitre précédent, les auteurs tentaient de mesurer l'adéquation entre la simulation d'une scène par un algorithme de rendu de type radiosité, et une maquette représentant la même scène. Dans un premier temps, il s'agissait de comparer des mesures photométriques. Puis, lors d'une expérience, on montrait simultanément l'image de synthèse et la maquette à un sujet qui devait répondre à une série de questions. Cela permettait de vérifier la validité psycho-visuelle de la simulation.

L'article [RWP⁺95] a, le premier, tenté de poser la problématique en terme de calcul de distance. Les auteurs se sont appuyés sur trois algorithmes issus du domaine de la compression d'images. Tous trois font appel à une transformée de fourier puis à un filtrage. Les auteurs ont donc comparé les mérites relatifs des trois distances sur des images de luminances. Celles-ci provenaient d'une part d'une caméra munie d'un capteur CCD placée devant une scène, et d'autre part de simulations de cette scène par divers algorithmes de rendu ("flat", lancer de rayons de type Radiance¹). Pour juger de la qualité d'un algorithme de distance, les auteurs ont défini cinq critères d'évaluation s'inspirant de la définition mathématique d'une distance, et de plus fixant des objectifs assez pragmatiques. Soient A , B , C et D des images de luminance, et d la distance utilisée. Les critères à vérifier, selon les auteurs de [RWP⁺95], sont:

1. $d(A, A) = 0$;
2. $d(A, B) = d(B, A)$;
3. Si A et B apparaissent similaires, et A et C différentes, alors:
 $d(A, B)/d(A, C) \gg 1$;
4. Si A , B et C apparaissent toutes similaires deux à deux, alors:
 $d(A, B)/d(A, C) \approx 1$;
5. Si la différence entre A et B est identique à celle entre C et D , alors:
 $d(A, B)/d(C, D) \approx 1$.

1. Les auteurs ont aussi utilisé une image bruitée, de moyenne et d'écart-type similaires à celle fournie par la caméra, afin de construire une image dont la distance avec la référence est la plus grande possible.

Enfin une autre voie de recherche semble se développer autour de l'utilisation de bases d'ondelettes [GM97]. Cet outil permet de dégager les structures contenues à divers niveaux d'échelle dans une image.

6.3 La méthode que nous avons développée

L'objectif essentiel de cette méthode [RP97b] est de comparer le rendu d'images de synthèse.

Pour pouvoir appliquer notre algorithme, nous ferons donc les hypothèses suivantes:

1. Le point de vue est identique pour les deux images. Nous comparons ici des images de synthèse pour lesquelles la position de la caméra est rigoureusement la même. La comparaison avec l'image digitalisée d'une scène réelle ou d'une maquette nécessite l'emploi d'outils de recadrage qui ne seront pas utilisés ici;
2. Les textures sont exclues des scènes considérées. Cela permet d'éviter les problèmes de perception des fréquences spatiales. Là encore, des solutions pour répondre à ce problème existent (transformée de Fourier puis filtrage).
3. Enfin, nous nous restreindrons au cas de scènes ne comportant qu'un seul type de source lumineuse.

Moyennant ces hypothèses, nous allons définir une distance entre images pixel à pixel. L'algorithme que nous proposons repose sur les deux idées suivantes:

- A chaque pixel, nous allons associer deux masques qui correspondent à l'acuité visuelle de l'oeil. Par ailleurs, le masque le plus étroit, correspondant à la vision fovéale, sera restreint à l'ensemble des pixels appartenant au même objet que le pixel central;
- Nous utiliserons pour notre calcul de distance l'espace LLab qui a été mis au point pour décrire l'apparence des couleurs et pour permettre de calculer des différences de couleur.

6.4 Outils nécessaires au calcul de la distance

6.4.1 L'acuité visuelle

Nous utilisons une division du champ visuel en deux zones :

- Le focus qui est une zone de 2 degrés correspondant à la vision fovéale [Lev85];
- L'arrière-fond qui correspond à un angle de vision de 20 degrés [PC72].

A chaque pixel (i, j) (pixel central) de l'image, on associe deux masques :

- Une zone rectangulaire de 2 degrés autour de (i, j) comprenant ng_2 pixels à gauche, nd_2 à droite, nh_2 en haut, nb_2 en bas;
- Une zone rectangulaire de 20 degrés autour de (i, j) , avec respectivement ng_{20} , nd_{20} , nh_{20} , nb_{20} pixels à gauche, à droite, en haut et en bas;

qui définissent notre zone d'étude.

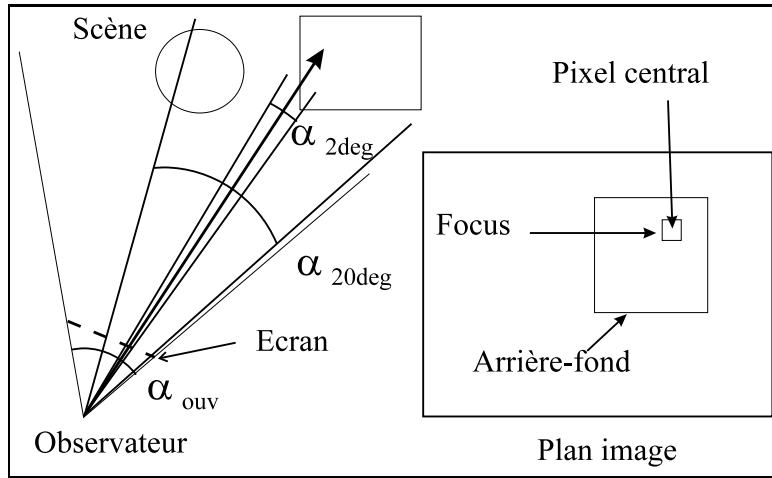


FIG. 6.1 – Le champ visuel utilisé

Pour calculer ces masques, nous employons les formules suivantes:

$$\begin{aligned}
 ng &= i - \frac{1}{2} \frac{2 i n_{ph} \tan \frac{\alpha_h}{2} - n_{ph}^2 \tan \frac{\alpha_p}{2}}{n_{ph} \tan \frac{\alpha_h}{2} + 2 i \tan \frac{\alpha_h}{2} \tan \frac{\alpha_p}{2}} \\
 nd &= \frac{1}{2} \frac{2 j n_{ph} \tan \frac{\alpha_h}{2} + n_{ph}^2 \tan \frac{\alpha_p}{2}}{n_{ph} \tan \frac{\alpha_h}{2} - 2 j \tan \frac{\alpha_h}{2} \tan \frac{\alpha_p}{2}} - i \\
 nh &= j - \frac{1}{2} \frac{2 i n_{pv} \tan \frac{\alpha_v}{2} - n_{pv}^2 \tan \frac{\alpha_p}{2}}{n_{pv} \tan \frac{\alpha_v}{2} + 2 i \tan \frac{\alpha_v}{2} \tan \frac{\alpha_p}{2}} \\
 nb &= \frac{1}{2} \frac{2 j n_{pv} \tan \frac{\alpha_v}{2} + n_{pv}^2 \tan \frac{\alpha_p}{2}}{n_{pv} \tan \frac{\alpha_v}{2} - 2 j \tan \frac{\alpha_v}{2} \tan \frac{\alpha_p}{2}} - j
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

où

- i et j désignent les coordonnées du pixel par rapport au centre de l'écran;
- α_p désigne l'angle d'observation de la zone à calculer (2 ou 20 degrés);

- α_h et α_v sont les angles d'ouverture (horizontal et vertical);
- n_{ph} et n_{pv} sont les nombres de pixels par ligne et par colonne.

L'acuité visuelle décroît grossièrement en $\frac{1}{\theta}$ [Bur88], où θ est l'angle par rapport à l'axe visuel. On approxime ce fait par la distribution des poids suivante:

- Un poids constant égal à un dans la zone de focus;
- Un poids linéairement décroissant de 1 à 0, du centre vers les bords de l'arrière-fond.

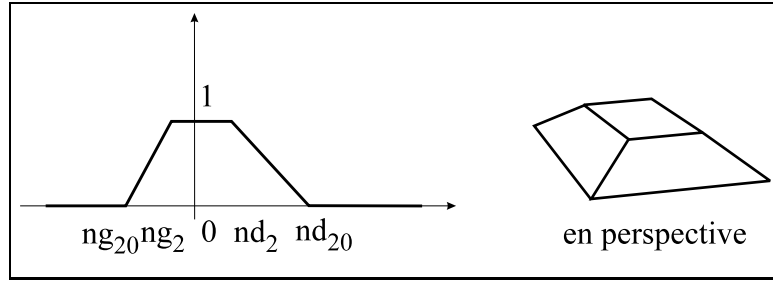


FIG. 6.2 – *Distribution des poids*

On notera p_f la somme des poids associés à la zone de focus, et p_a la somme des poids associés au seul arrière-fond.

Sur les bords de l'image, les masques sont clippés, et les valeurs de p_f et p_a sont mises à jour en conséquence.

6.4.2 Raffinement de la zone d'étude par segmentation

Comme nous le verrons plus loin, le calcul des divers paramètres associés à l'espace LLab correspond à une situation où l'on présente à un observateur une cible uniforme devant un fond achromatique. Or, les zones d'étude définies précédemment contiennent une partie de la scène où il est possible qu'un certain nombre d'apparences diverses se trouvent mêlés. Afin de se rapprocher de la situation expérimentale, nous supposons donc que, dans la zone de focus, l'attention visuelle de l'observateur le conduit à détacher l'objet visé dans la direction du pixel central du reste, qui constitue alors le fond.

Il est donc nécessaire que le programme de rendu fournisse à l'algorithme de calcul de distance une segmentation de l'image. Dans notre cas, le lancer de rayons utilisé produit, outre une image calculée, un fichier contenant pour chaque pixel le numéro de l'objet et le numéro de la face intersectés par le rayon primaire.

Moyennant ce renseignement, nous pouvons raffiner la zone d'étude. Pour cela, nous la subdivisons en deux zones (voir Fig. 6.3):

- La *cible* comprenant tous les pixels du focus dont les numéros d'objet et de face sont égaux à ceux du pixel central;
- Le *fond* comprenant tous les pixels de l'arrière-fond, plus ceux du focus dont les numéros d'objet ou de face sont différents de ceux du pixel central.

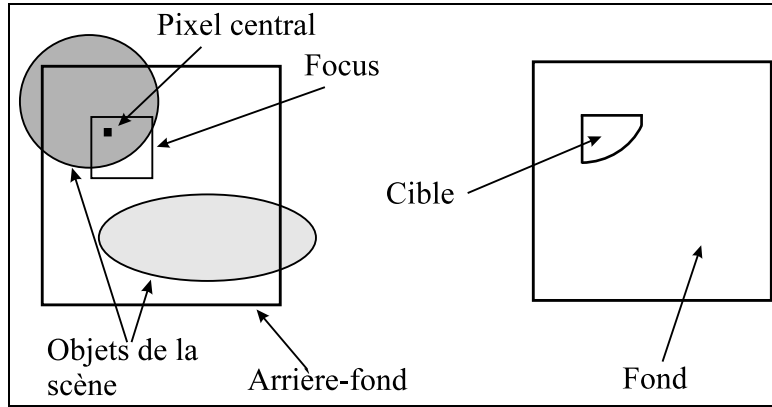


FIG. 6.3 – *Raffinement de la zone d'étude*

A l'issue de cette segmentation, les valeurs de p_f et de p_a sont modifiées pour désigner respectivement les sommes des poids de la cible et du fond.

6.4.3 L'espace LLab

Cet espace [Luo96], dérivé de l'espace CIE Lab 1976, a été mis au point pour décrire au mieux l'apparence des couleurs et calculer des différences de couleur dans des conditions très générales.

L'utilisation de l'espace LLab nécessite deux étapes.

La première est un calcul d'adaptation chromatique (via une transformée de type BFD [Lam85]). Cela permet, à partir des composantes $X_s Y_s Z_s$ de la surface colorée sous un illuminant quelconque de composantes $X_{0s} Y_{0s} Z_{0s}$, de se ramener aux composantes $X_r Y_r Z_r$ de cette même surface telle qu'elle apparaîtrait sous l'éclairage d'une source de type D6500, dont les composantes seront notées $X_{0r} Y_{0r} Z_{0r}$.

Soit l'équation matricielle:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

avec:

$$\begin{pmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Cette formule permet de d'obtenir les coordonnées: R_{0r} , G_{0r} , B_{0r} , R_{0s} , G_{0s} , B_{0s} et R_s , G_s , B_s .

Puis, les coordonnées R_r , G_r et B_r se calculent de la façon suivante:

$$\begin{aligned} R_r &= R_o R_s / R_{0s} \\ G_r &= G_o G_s / G_{0s} \\ B_r &= B_o (B_s / B_{0s})^\beta \end{aligned} \quad (6.4)$$

où: $\beta = (B_{0s} / B_{0r})^{0.0834}$.

Enfin, les composantes $X_r Y_r Z_r$ cherchées s'obtiennent par:

$$\begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} R_r / Y_s \\ G_r / Y_s \\ B_r / Y_s \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

La deuxième étape est un calcul, modifié par rapport à l'espace CIE Lab 1976, des attributs de sensation visuelle suivants: Clarté (L_L), oppositions rouge-vert (A_L), opposition jaune-bleu (B_L), chroma (C_L), angle de teinte (h_L) et teinte (H_L).

Rappelons que les calculs indiqués ci-dessous se rapportent à l'expérience suivante: une surface colorée de taille deux degrés d'angle de vision est entourée d'un fond achromatique uniforme. Notons L la luminance lumineuse (en $lum/m^2 sr$) de la source de référence (ici D6500), et Y_b la clarté du fond achromatique entourant la surface colorée.

Trois paramètres: F_S , F_L et F_C sont utilisés pour réaliser les calculs. Leurs valeurs définies ci-dessous dépendent du rapport $Yb/100$.

	F_S	F_L	F_C
Fond moyen ($20 \leq Yb/100$)	3.0	1.0	1.00
Fond sombre ($1 \leq Yb/100 \leq 20$)	3.5	1.0	1.15
Fond très sombre ($Yb/100 \leq 1$)	4.2	1.0	0.95

TAB. 6.1 – Détermination des paramètres F_S , F_L et F_C

Soient $X_N = 95.05$, $Y_N = 100.0$ et $Z_N = 108.88$ les composantes trichromatiques du blanc de référence D6500. On obtient les divers attributs de sensation visuelle comme suit :

$$\begin{aligned} L_L &= 116f(Y)^z - 16 \\ A &= 500(f(X) - f(Y)) \\ B &= 200(f(Y) - f(Z)) \end{aligned}$$

où $z = 1 + F_L \sqrt{Yb/100}$

Si $X_r/X_N, Y_r/Y_N$ ou $Z_r/Z_N > 0.008856$

$$\begin{aligned} f(X) &= (X_r/X_N)^{1/F_S} \\ f(Y) &= (Y_r/X_N)^{1/F_S} \\ f(Z) &= (Z_r/X_N)^{1/F_S} \end{aligned}$$

Si $X_r/X_N, Y_r/Y_N$ ou $Z_r/Z_N \leq 0.008856$

$$\begin{aligned} f(X) &= ((0.008856^{1/F_S} - 16/116)/0.008856) X_r/X_N + 16/116 \\ f(Y) &= ((0.008856^{1/F_S} - 16/116)/0.008856) Y_r/Y_N + 16/116 \\ f(Z) &= ((0.008856^{1/F_S} - 16/116)/0.008856) Z_r/Z_N + 16/116 \end{aligned}$$

$$C_L = (4.907 + 0.162C + 10.92 \ln(0.638 + 0.07216C)) F_C S_C$$

où $C = \sqrt{A^2 + B^2}$ et $S_C = 1.0 + 0.47 \log L - 0.057(\log L)^2$

$$h_L = \arctan2(B, A)$$

où $\arctan2$ désigne la fonction renvoyant un angle compris entre 0 et 360 degrés (voir chapitre 3)

$$\begin{aligned} A_L &= C_L \cos(h_L) \\ B_L &= C_L \sin(h_L) \end{aligned}$$

La valeur de H_L s'obtient par interpolation linéaire des valeurs H_{L1} et H_{L2} des deux primaires les plus proches (Rouge, Jaune, Vert et Bleu) définies sur un cercle, soit:

$$H_L = H_{L1} + (H_{L2} - H_{L1}) \frac{h_L - h_{L1}}{h_{L2} - h_{L1}}$$

On définit une notion de distance colorimétrique de la manière suivante. Supposons que l'on possède deux surfaces colorées, entourées chacune d'un fond achromatique, et éclairées par deux illuminants quelconques. On calcule d'abord leurs coordonnées $X_r Y_r Z_r$, afin de se ramener aux conditions d'éclairement que fournirait l'illuminant standard D6500. Puis, pour chacune des surfaces, on détermine la clarté (L_L), la chromaticité (C_L) et l'angle de teinte (h_L). La différence couleur est alors:

$$\Delta E_L = \sqrt{(\Delta L_L)^2 + (\Delta C_L)^2 + (\Delta H_L)^2} \quad (6.6)$$

où:

$$\begin{aligned} \Delta L_L &= L_{L2} - L_{L1} \\ \Delta C_L &= C_{L2} - C_{L1} \\ \Delta H_L &= 2\sqrt{C_{L2}C_{L1}} \sin((h_{L2} - h_{L1})/2) \end{aligned}$$

6.5 La méthode proposée

En entrée du programme de calcul de distance que nous avons mis au point se trouvent deux images calculées, représentées par des fichiers `img1.lum` et `img2.lum`. Ceux-ci associent à chaque pixel trois nombres réels (float). Ces trois nombres sont supposés être des composantes *RGB* CIE 1931 (voir 3.2.5.2)

6.5.1 Passage de *RGB* vers *XYZ*

La matrice de passage utilisée est:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Or le calcul de rendu dont sont issues les images que nous allons comparer attribue à la source des coordonnées $R = 1$, $G = 1$ et $B = 1$, soit après transformation $X = 1$, $Y = 1$ et $Z = 1$ aussi. Nous allons supposer, pour éviter un calcul d'adaptation chromatique, que la source présente dans la scène est de type D6500. Par transformée inverse, les coordonnées de celle-ci doivent être: $R = 0.841$, $G = 1.089$ et $B = 1.033$. Comme cette source est la seule dans nos scènes tests, il suffit de multiplier les coordonnées *RGB* issues des fichiers `.lum` par ces trois nombres respectifs, puis de leur appliquer la matrice de transformation.

La source supposée émettre une puissance énergétique de $100W/m^2sr$, se voit donc attribuer une puissance lumineuse $L = 6.8310^5 lum/m^2sr$.

6.5.2 Le calcul d'une distance pour chaque pixel

L'objectif de notre travail est le suivant: on imagine la présence de deux observateurs virtuels dans la scène et on veut comparer leurs sensations². Leur attention visuelle est attirée de manière équiprobable dans toutes les directions.

Nous procédons donc comme suit, pour chaque pixel des images 1 et 2.

1. On calcule les tailles des zones d'étude associées aux angles de vision 2 et 20 degrés à l'aide des équations 6.1;
2. On attribue un poids à chaque pixel suivant qu'il est dans le focus ou dans l'arrière-fond;
3. On calcule p_f et p_a ;
4. On affine cette zone d'étude par segmentation en séparant la cible du fond;

2. Cette méthodologie permet d'être indépendant de la Fonction de Reproduction des Couleur employée par la suite pour visualiser les images.

5. On met à jour les valeurs de p_f et de p_a .

On peut noter que le résultat issu de ces cinq premiers points est valable pour les deux images.

Puis, pour chaque pixel de chaque image:

6. On calcule Y_b comme moyenne pondérée des coordonnées Y des pixels appartenant à la zone de fond: $Y_b = \frac{1}{p_a} \sum_{pixel \in fond} poids_{pixel} 100 \frac{Y_{pixel}}{L}$;
7. Suivant la valeur du rapport $\frac{Y_b}{100}$, on détermine les valeurs de F_S , F_L et F_C .
8. On détermine les coordonnées L_L , C_L et h_L de chaque pixel de la zone cible.

Rmq: Dans la définition de l'espace LLab, la cible est supposée entourée d'un fond achromatique uniforme, ce qui n'est pas le cas ici en général.

Finalement, comme la zone cible correspond à la vision fovéale et donc à une acuité maximale, chaque détail y est important.

9. On calcule donc l'erreur ΔE_L pixel à pixel de la zone cible, entre les images 1 et 2, suivant l'équation 6.6;
10. On affecte au pixel central la moyenne des erreurs, soit $dist(i, j) = \frac{1}{p_f} \sum_{pixel \in cible} \Delta E_L$.

En sortie, notre programme fournit donc une image de distance, sous forme de fichier .dist, contenant, pour chaque pixel, un nombre réel correspondant à la distance calculée.

6.6 Tests

6.6.1 Première base de données

Pour ces test, nous utilisons trois images de taille 512x512, représentant une scène standard, la “cornell_box”:

- *cornell_amb* issue d'un lancer de rayon standard avec terme ambiant (temps de calcul : 3 mn 27 s);
- *cornell_vei* issue d'un lancer de rayon avec évaluation de la composante indirecte par interpolation vectorielle [ZP98] (temps de calcul 4 mn 9 s);
- *cornell_mc* issue d'un rendu par la méthode Monte-Carlo avec 256 échantillons par hémisphère (temps de calcul 14 h 5 mn 13 s).

Ces images sont présentées dans la figure 6.4

Cette dernière image constituant notre référence, nous allons calculer une image de distance entre *cornell_amb* et *cornell_mc*, puis entre *cornell_vei* et *cornell_mc*.

6.6.2 Résultats

Le temps de calcul nécessaire pour l'obtention du fichier de distance est, sur une station IRIS Indigo 2 disposant d'un R10000 cadencé à 200 MHz, d'environ 35 minutes. Ce temps est élevé car l'algorithme a un fonctionnement forcément séquentiel. De plus, pour des images de cette taille (512x512), le masque de fond, au centre de l'image, a une taille d'environ 100x100 pixels.

Les résultats peuvent être exploités de deux manières différentes, soit statistiquement, soit en fabriquant une image de distance visualisable.

6.6.2.1 Analyse statistique

Les résultats concernant les deux images de distance obtenues figurent dans le tableau suivant.

	Amb : MC	VEI : MC
Distance moyenne	12.24	4.17
Ecart_type	8.23	1.44
Min	1.58	0.80
Max	40.17	14.90
$ L_{L2} - L_{L1} $		
Moyenne	7.56	3.54
Ecart_type	5.17	1.39
Min	0.23	0.28
Max	23.06	13.54
$ C_{L2} - C_{L1} $		
Moyenne	3.97	1.65
Ecart_type	4.62	1.03
Min	0.08	0.13
Max	33.29	8.49
$ H_{L2} - H_{L1} $		
Moyenne	5.93	0.99
Ecart_type	7.74	0.99
Min	0.11	0.01
Max	34.25	11.56

TAB. 6.2 – Résultats statistiques pour la première base de données

Ces résultats sont conformes à nos attentes, c'est à dire que la distance moyenne, l'écart-type, la valeur minimale et la valeur maximale sont plus faibles pour le couple VEI:MC que pour le couple Amb:MC.

6.6.2.2 Image de distance visualisable

Cette manière d'opérer a pour avantage de permettre de situer les zones de faibles ou de fortes erreurs. A partir des fichiers .dist, on fabrique des images en fausses couleurs³. Moyennant deux seuils définis par l'utilisateur, seuil-indiscernabilité et seuil-acceptabilité, les couleurs affectées sont les suivantes:

- Si $dist(i, j) < \text{seuil-indiscernabilité}$, Bleu = Rouge = Vert = 0;
- Si $\text{seuil-indiscernabilité} \leq dist(i, j) \leq \text{seuil-acceptabilité}$, $0 \leq \text{Vert} = \text{Rouge} = \text{Bleu} \leq 255$ par interpolation linéaire;
- Si $dist(i, j) > \text{seuil-acceptabilité}$, Rouge = Vert = Bleu = 255.

Les résultats sont affichés sur la figure 6.4 avec:

- seuil-indiscernabilité = 1
- seuil-acceptabilité = 5

Remarques pratiques : Pour obtenir des images plus “lissées”:

1. Fs a été interpolé linéairement entre 4.2 et 3.0, pour $1 \leq Yb/100 \leq 20$;
2. Au lieu d'affecter au pixel central la moyenne des erreurs, on a pris la valeur médiane. Cela a pour effet de gommer le bruit résiduel provenant de l'anti-alliassage.

6.6.3 Deuxième base de données

Nous avons cette fois employé quatre images de taille 400x400.

- *spheres_amb* issue d'un lancer de rayon standard avec terme ambiant (temps de calcul : 1 mn 14 s);
- *spheres_ward* issue d'un lancer de rayon de type Radiance, avec évaluation de la composante diffuse par interpolation scalaire (temps de calcul: 24 mn 59 s);
- *spheres_vei* issue d'un lancer de rayon avec évaluation de la composante indirecte par interpolation vectorielle [ZP98](temps de calcul: 24 mn 04 s);
- *spheres_mc* issue d'un rendu par la méthode Monte-Carlo (temps de calcul 2 h 23 mn 23 s).

Ces images sont représentées sur la figure 6.5.

A nouveau, la dernière image constitue notre référence. Nous allons donc calculer trois distances, entre: *spheres_amb-spheres_mc*, *spheres_ward-spheres_mc* et *spheres_vei-spheres_mc*.

3. Ici, ce sont des niveaux de gris.

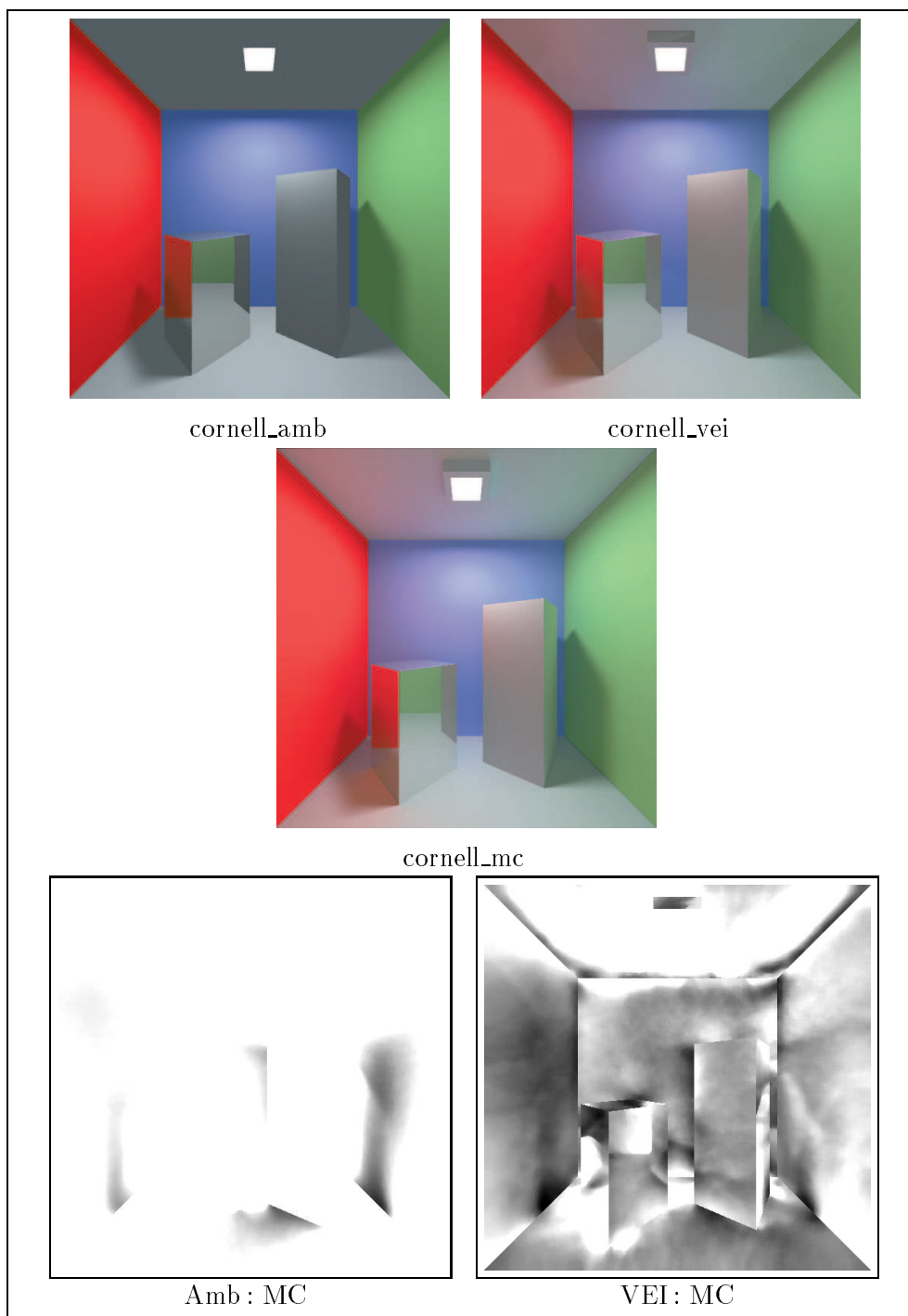


FIG. 6.4 – Images de test et de distance: première base de données

6.6.3.1 Résultats statistiques

Les résultats suivant ont été obtenus:

	Amb : MC	Ward : MC	VEI : MC
Distance moyenne	6.29	3.27	1.49
Ecart_type	2.75	3.70	1.23
Min	1.21	0.61	0.24
Max	25.93	31.13	25.55
$ L_{L2} - L_{L1} $			
Moyenne	4.96	3.21	1.50
Ecart_type	2.74	3.51	1.29
Min	0.49	0.52	0.28
Max	19.19	29.92	29.90
$ C_{L2} - C_{L1} $			
Moyenne	2.12	0.79	0.51
Ecart_type	1.76	1.07	0.37
Min	0.17	0.14	0.07
Max	17.01	14.72	7.60
$ H_{L2} - H_{L1} $			
Moyenne	1.86	0.46	0.31
Ecart_type	1.96	0.77	0.36
Min	0.02	0.02	0.02
Max	23.01	10.85	5.91

TAB. 6.3 – Résultats statistiques pour la deuxième base de données

Là encore les résultats sont conformes à nos attentes.

6.6.3.2 Images de distances

Les résultats sont affichés sur la figure 6.5 avec toujours:

- seuil-indiscernabilité = 1
- seuil-acceptabilité = 5

6.6.4 Etude des paramètres d'un logiciel de rendu

Dans ce paragraphe, au lieu de comparer le rendu obtenu par divers algorithmes, nous nous sommes attachés à juger de la qualité de rendu d'un seul et même algorithme dont on fait varier les valeurs de paramètres en entrée. Cette étude est menée afin de déterminer les seuils au delà (ou en dessous) desquels il n'y a plus amélioration notable du rendu par rapport à une référence, malgré une augmentation du temps de calcul.

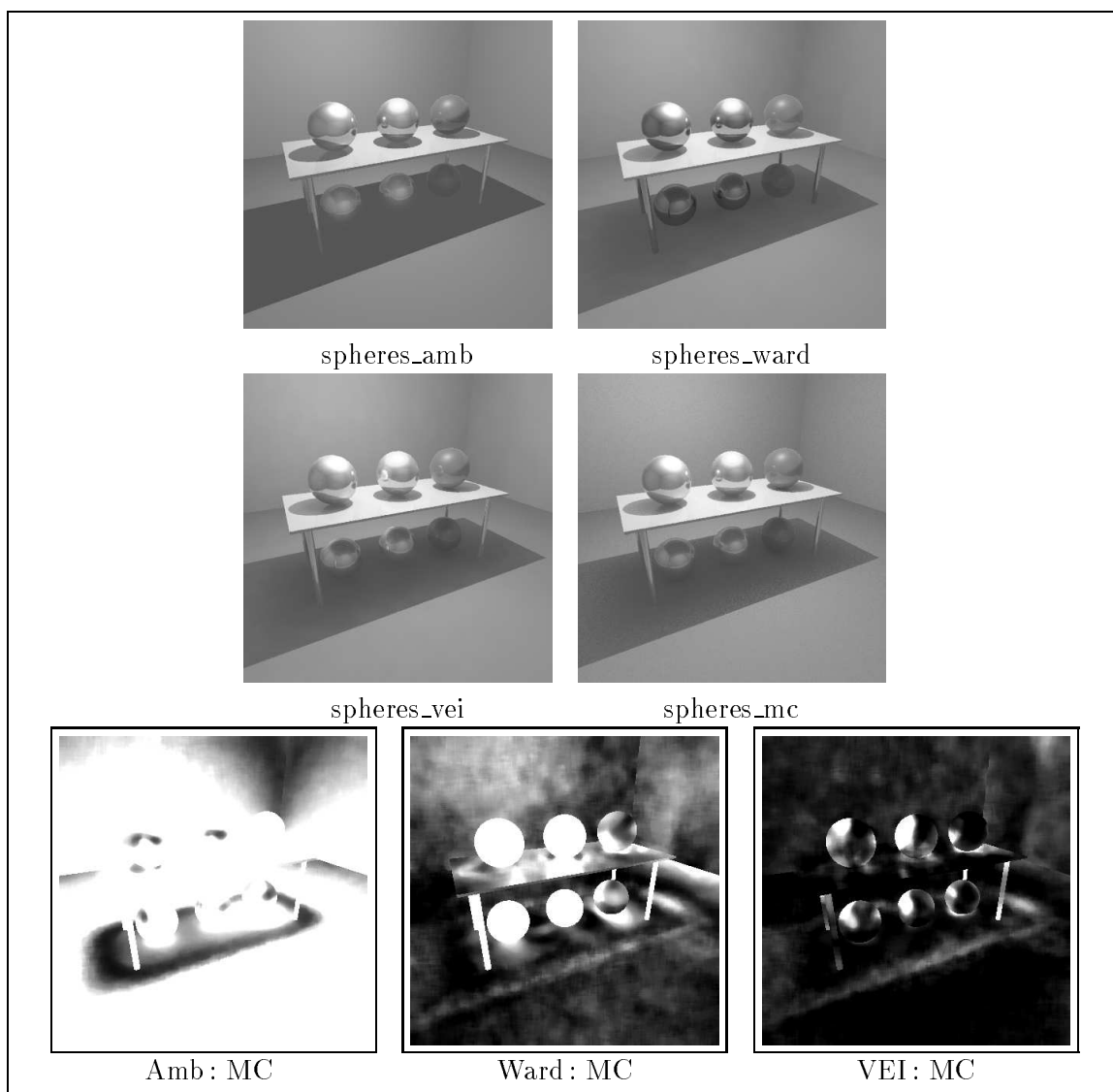


FIG. 6.5 – Images de test et de distance: deuxième base de données

D'autre part, elle permet de juger de l'importance relative des paramètres entre eux, en identifiant celui (ou ceux) dont les valeurs guident de façon prépondérante la qualité du résultat.

On peut dire, brièvement, que le lancer de rayon avec évaluation de la composante indirecte par interpolation vectorielle (voir [ZP98]) dont on s'est servi auparavant utilise, pour l'essentiel, deux paramètres :

- Nb-Echant-Hemi : le nombre d'échantillons par hémisphère permettant de calculer localement la composante indirecte;
- Nb-VEI : le nombre initial de points dans la scène pour lesquels on effectue un calcul de composante indirecte;

Nous avons pu déterminer des images de distance par rapport à *cornell_mc* en utilisant une base de données d'images de type : *cornell_vei_Nb-Echant-Hemi_Nb-VEI*.

Cette étude n'étant pas encore achevée à l'époque de la rédaction de ce mémoire nous nous contenterons de présenter un premier résultat intéressant. Sur la figure 6.6 sont présentées en vis à vis les images *cornell_vei_032_4096* et *cornell_mc*, avec en dessous, l'image de distance que l'on obtient avec notre algorithme. On peut discerner sur cette dernière un certain nombre de "tâches". Celles-ci, loin d'être des artéfacts, sont en fait liées au fonctionnement de l'algorithme de rendu. Elles correspondent aux zones d'interpolation autour des points où l'on calcule la composante indirecte. Cela permet ainsi de conclure à une valeur du paramètre Nb-VEI trop faible.

Notons que ces zones avaient initialement échappé à notre vigilance lors de la visualisation de l'image *cornell_vei_032_4096* sur les moniteurs couleur de notre laboratoire. Or, après les avoir localisé à l'aide de l'image de distance, celles-ci sont devenues clairement perceptibles⁴. Cette remarque repose donc avec force le problème de la fixation des valeurs de seuils d'imperceptibilité et d'acceptabilité.

6.6.5 Comparaison avec une distance RMS

En image numérique, un des algorithmes de distance les plus simples (et le plus souvent employé) consiste à calculer des erreurs pixel à pixel. Nous avons implémenté cette méthode en calculant des distances dans l'espace Lab entre pixels des images .lum.

Le tableau 6.4 donne les résultats statistiques obtenus pour la première base de données (voir 6.6.1).

La distance moyenne sur l'ensemble de l'image est toujours plus grande que celle obtenue à l'aide de notre algorithme. De plus, on a constaté une dispersion statistique plus importante.

On peut, de la même manière que pour notre algorithme, produire des images de distance. Celles-ci sont très bruitées. Et, comme on peut le voir sur la figure 6.6, le

4. Ce qui est bien sûr impossible sur la version imprimée de ce mémoire.

	Amb : MC	VEI : MC
Distance moyenne	13.06	5.30
Ecart_type	7.50	2.81
Min	1.05	0.08
Max	79.58	108.10
$ L_{L2} - L_{L1} $		
Moyenne	9.53	4.53
Ecart_type	6.68	2.15
Min	0.00	0.00
Max	79.36	107.75
$ C_{L2} - C_{L1} $		
Moyenne	4.65	1.99
Ecart_type	4.93	2.11
Min	0.00	0.00
Max	60.15	52.69
$ H_{L2} - H_{L1} $		
Moyenne	4.35	0.81
Ecart_type	5.15	1.36
Min	0.00	0.00
Max	50.11	51.96

TAB. 6.4 – Distance RMS: Résultats statistiques pour la première base de données

résultat concernant les images *cornell_lamb* et *cornell_vei* est assez différent bien que l'on ait employé les mêmes valeurs pour seuil-indiscernabilité et seuil-acceptabilité.

6.7 Conclusion et développements futurs

Nous avons défini un algorithme de calcul de distance perceptuelle entre images couleurs, spécifique au domaine de la synthèse d'images. Les tests effectués sur les deux bases de données (Cornell, et Sphère) révèlent la pertinence de cet outil. L'étude portant sur les valeurs des paramètres d'entrée de l'algorithme de rendu utilisé dans notre laboratoire devrait permettre de qualifier plus objectivement le comportement de ce dernier. Enfin, nous avons rendu compte des différences parfois notables entre nos résultats et ceux issus d'une méthode RMS classique.

Nous avons également implémenté une variante de la méthode. Celle-ci repose sur l'idée que lorsqu'un observateur examine un objet, au lieu de fixer uniquement son attention en une seule direction, il le balaie du regard. Pour rendre compte de ce fait, dans la variante de notre algorithme, à chaque fois qu'un pixel se trouve être dans la zone cible d'un pixel visé, on stocke la distance calculée en ce point. Et, au fur et à mesure du balayage, à chaque fois que cette configuration se reproduit, on somme les nouvelles distances. La somme totale obtenue dépend donc du nombre de fois où le pixel

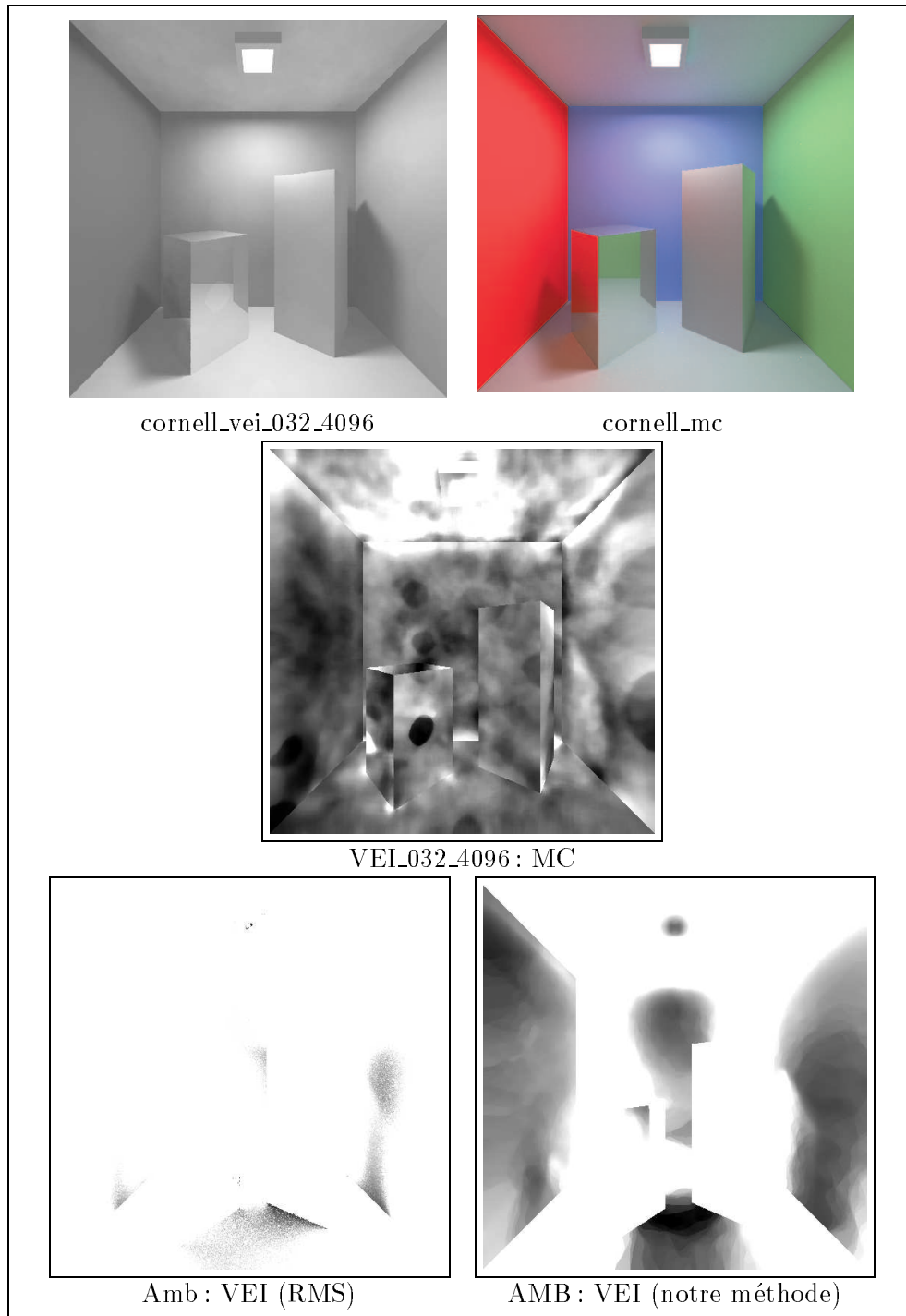


FIG. 6.6 – *Etude portant sur les paramètres et comparaison avec une distance RMS*

s'est trouvé être dans la zone cible d'un pixel central, et de l'influence de son voisinage. Les images obtenues par cette variante sont assez bruitées et moins lissées puisqu'on n'affecte plus la valeur moyenne ou médiane de ses voisins à chaque pixel visé.

Pour prendre en compte les scènes texturées, et aussi être peu sensible à l'antialiasage, on peut comme dans de nombreuses méthodes utiliser une transformée de Fourier, accompagnée d'un filtrage. Ce rajout ne semble pas devoir poser de problèmes.

Notons que lorsque l'on disposera d'un logiciel de rendu spectral opérationnel, on pourra directement obtenir des images de composantes XYZ , ce qui évitera les manipulations du paragraphe 6.5.1.

L'un des problèmes majeurs de notre méthode est qu'elle emploie l'espace LLab en dehors de son contexte de définition. Remarquons que, même après segmentation de la zone de focus, la cible n'est pas forcément uniforme. Elle contient l'image de la face d'un objet. Si celui-ci n'est pas plan, il peut y avoir variation de l'éclairement, et donc de la couleur. De plus, cette face peut être en partie dans l'ombre, ou bien refléter ou réfracter l'image d'un autre objet. On pourrait donc employer une segmentation plus fine, en utilisant l'information donnée par les rayons d'ombre et de réflexion (ou réfraction). Le fond n'est lui non plus pas uniformément achromatique. On pourrait, pour répondre en partie à ce problème, calculer la luminance Y_b comme moyenne pondérée des luminances équivalentes des pixels de l'arrière fond.

Nous avons indiqué dans les tableaux 6.2 et 6.3, les résultats statistiques liés aux tests que nous avons effectué sur les deux bases de donnée. Si on veut ne donner qu'un seul chiffre reflétant la distance entre images, la première idée est de prendre la moyenne des distances pixel à pixel. Cependant, on n'est pas sûr que cela définisse une distance au sens mathématique du terme. Si les deux premières conditions: $d(A, A) = 0$ et $d(A, B) = d(B, A)$ sont évidemment satisfaites, rien n'est moins sûr en ce qui concerne l'inégalité triangulaire. Plutôt que d'utiliser une moyenne, on pourrait définir un chiffre reflétant des différences spatio-colorimétriques. En effet, si toutes les plus grandes distances obtenues sont concentrées en une seule zone, cela ne revient pas au même que si elles sont au contraire disséminées dans toute l'image. Ayant défini cette nouvelle distance, on pourrait alors se contenter de satisfaire aux cinq critères décrits dans [RWP⁺95]. Cela permettrait de valider notre méthode.

Obtenir un chiffre n'est de toute façon pas un but en soit. Il faut pouvoir, au moyen de seuils, qualifier la distance obtenue. Est-elle grande? Tolérable? Insignifiante? etc. On peut, à ce propos, citer [CM90], dans lequel les auteurs évoquent une classification standard, que l'on peut rapporter dans le tableau suivant:

Pour fixer les seuils numériques correspondants, nous pensons recourir à une série d'expériences auprès d'une population test, pour une base de données aussi vaste que possible d'images de synthèse. Chaque personne devra alors classer les différences observées sur une échelle de graduation similaire à celle que nous venons d'évoquer. Les images pourront être présentées simultanément, côte à côte, ou bien être affichées alternativement, en s'inspirant des méthodes par minimum de papillotement utilisées en colorimétrie. Notons que pour s'astreindre le plus possible de la Fonction de Repro-

Note	Appariement	Qualité
5	Imperceptible	Excellent
4	Perceptible mais pas ennuyeux	Bon
3	Un peu ennuyeux	Moyen
2	Ennuyeux	Faible
1	Très ennuyeux	Mauvais

TAB. 6.5 – *Classification des distances entre images*

duction des Couleurs, ce type d'expérience exigera de prendre beaucoup de précautions tant au niveau de la création de l'image (dont les composantes trichromatiques devront, par exemple, toutes être comprises à l'intérieur des possibilités du moniteur), que de l'affichage de celle-ci après calibration du dit moniteur couleur.

Signalons enfin qu'il serait particulièrement utile en notre domaine, d'évaluer dynamiquement de telles distances, afin de guider perceptuellement la charge de calcul. Pour une méthode utilisable en radiosité, on peut se référer à [GH97]).

Chapitre 7

Conclusion

Au cours de ce mémoire de thèse, nous avons abordé une bonne partie des problèmes liés à la couleur en synthèse d'images.

Le problème de la mise en oeuvre d'un rendu spectral, ainsi que quelques unes des difficultés inhérentes à une telle entreprise, ont été exposés. Nous avons tout d'abord comparé l'efficacité des méthodes existantes. Comme nous l'avons signalé, celles-ci peuvent être regroupées en deux grandes familles : celles utilisant un échantillonnage plus efficace que celui de la méthode de référence, et celles s'appuyant sur une projections des données spectrales sur une base de fonctions. L'analyse des tests a permis de montrer que les premières permettaient d'effectuer des calculs de produit spectre-réflectance de manière très rapide, alors que les secondes étaient capables de passer à des composantes trichromatiques de façon simple et exacte. En revanche, aucune d'entre elles n'offrait la possibilité de s'adapter dynamiquement aux données à traiter, afin de garantir au final des erreurs colorimétriques acceptables. Nous avons donc présenté une méthode adaptative qui, à l'issue de ses propres tests, semble donner des résultats satisfaisants. Nous avons, par la suite, évoqué quelques extensions possibles de son fonctionnement.

Il reste maintenant, bien sûr, à intégrer cette méthode dans le logiciel de lancer de rayons que l'on utilise dans notre laboratoire. Ce travail est à l'heure actuelle en cours de réalisation. Ce passage obligé, une fois franchi, permettra de déboucher sur un nombre important d'applications.

L'une d'elles sera de pouvoir utiliser une Fonction de Reproduction des Couleurs. Nous avons décrit les méthodes existantes en la matière. Comme nous l'avons signalé, aucune d'entre elles n'est réellement capable de produire des images en couleurs. Nous avons, pour remédier à cela, proposé de simuler l'adaptation en luminance et l'adaptation chromatique. Si on parvenait à une solution acceptable, on pourrait obtenir des images inédites en notre domaine. Cela permettrait, par exemple, de rendre compte, tout simplement, de l'ambiance créée par des sources comme des lampes à incandescence, ou des tubes fluorescents. Il faut bien reconnaître que les images actuelles ont souvent un aspect irréel. Travailler, comme on le fait encore généralement, avec des coordonnées *RGB*, permet d'obtenir des images acceptables, mais finalement un peu passe-partout.

Notons tout de même, comme nous l'avons signalé, que cela demeure un problème très difficile. Pour mener à bien ce genre d'expérience de visualisation, il faut beaucoup de rigueur. Retenons aussi qu'un moniteur couleur est un outil assez imparfait et surtout limité en dynamique (tant sur les luminances que sur les chromaticités). Il faut donc se limiter à une fidélité couleur subjective. A ce niveau là, l'apport de domaines comme la photographie ou la peinture devrait permettre de gagner en qualité esthétique.

Nous avons enfin évoqué la mise au point d'une distance entre images en couleurs. La méthode que nous proposons est spécifique à notre domaine, car elle tire profit des connaissances supplémentaires qu'on a de la scène, par rapport aux simples images en deux dimensions. Les premiers résultats que l'on a obtenus sont encourageants. Cependant, cette méthode nécessite d'être encore développée. Tout d'abord, nous avons posé un certain nombre d'hypothèses simplificatrices fortes : même point de vue pour les deux images, pas de textures et présence d'un seul type de source (D65). Il faudra à l'avenir être opérant pour des images plus complexes que celles sur lesquelles nous avons travaillé. De plus, l'information visuelle pourra être analysée de manière plus fine en prenant en compte de nouveaux phénomènes liés à sa perception. Enfin, et surtout, il sera indispensable de valider par des expériences auprès d'un public comprenant à la fois des spécialistes et des néophytes en synthèse d'image, la méthode que l'on pourra mettre au point.

A l'issue des trois chapitres concernant les grands axes de recherches ayant trait à la couleur en synthèse d'images, nous avons finalement, à chaque fois apporté autant de réponses que de questions. Les problèmes traités demeurent extrêmement ouverts.

Les solutions apportées à l'avenir, pour être réellement novatrices, devront, selon nous, être à la fois efficaces informatiquement, rigoureuses colorimétriquement et au fait des dernières découvertes en matière de vision de la couleur.

Comme nous l'avons vu, la prise en compte de l'aspect spectral de la lumière est assez coûteux en temps de calcul. La visualisation d'images, après la mise en oeuvre d'une Fonction de Reproduction des Couleurs prenant en compte de nombreux aspects de la perception visuelle pourrait elle aussi être assez lente, ce qui est contraire à un besoin d'interactivité. De même, il serait bon d'obtenir une distance entre images évaluable dynamiquement lors du calculs de rendu. Ces trois problèmes exigent donc de trouver des implémentations de complexité algorithmique faible.

Comme nous l'avons remarqué en plusieurs endroits, en synthèse d'images, et plus généralement en image numérique, la colorimétrie lorsqu'elle est utilisée l'est souvent en dehors de son contexte. Comme on a à faire à des scènes complexes, on se trouve pas dans les cas simples dans lesquels les lois ont été définies. Il s'agit donc de faire preuve de rigueur, ou au moins de cohérence dans ses choix.

Ce point amène tout naturellement à la dernière spécification que nous avons évoquée plus haut. De nouvelles solutions pourraient tout simplement provenir du transfert de connaissances nouvellement acquises dans le domaine de la science des couleurs. Si cela est souhaitable, et possible, il faut tout de même remarquer que cette science n'est pas toujours d'un abord facile pour le non spécialiste. Le savoir y semble souvent

très éparpillé. Et il s'agit d'évoluer au milieu d'un foisonnement de lois et de formules diverses, toutes valables, s'appliquant à des phénomènes non encore bien maîtrisés¹. Ce fait freine sans doute la diffusion des connaissances liées à la couleur vers d'autres domaines, dont le notre.

Nous espérons, pour notre part, que ce mémoire aura contribué à apporter quelques lumières à celui de la synthèse d'images.

1. Comme le note Sève dans son livre, on peut penser qu'à l'avenir, une théorie plus complète embrassera ce qui paraît encore comme autant de cas particuliers. L'exposé des sciences de la couleur se fera alors de manière toute autre.

Annexe A

Gauss-Legendre: Méthode mathématique et valeurs numériques

A.1 Méthode mathématique

Etant donné une fonction $f(x)$ et une fonction de poids $w(x)$ positive sur un intervalle $[a, b]$, l'intégration gaussienne permet d'écrire :

$$\int_a^b f(x) w(x) dx = \sum_{i=0}^{i=n} H_i f(x_i) + R(f)$$

Les coefficients H_i sont déterminés par :

$$H_i = \int_a^b l_i(x) w(x) dx \text{ avec } 0 \leq i \leq j$$

où les fonctions $l_i(x)$ sont des polynômes de Lagrange, définis par :

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^{j=n} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \text{ avec } 0 \leq i \leq j$$

Les abscisses (x_0, x_1, \dots, x_n) sont calculées en utilisant une famille de polynômes $P_n(x)$ orthogonale à $w(x)$ sur l'intervalle $[a, b]$.

Si le produit scalaire est défini comme :

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x) g(x) w(x) dx$$

alors la condition d'orthogonalité pour les polynômes devient :

$$\langle P_n(x), P_m(x) \rangle = 0 \text{ avec } n \neq m$$

Ces polynômes peuvent être déterminés à l'aide des relation de récurrence suivantes:

$$\begin{aligned} P_{-1}(x) &= 0 \\ P_0(x) &= 1 \\ P_{k+1}(x) &= (x - A_k)P_k(x) - B_k P_{k-1}(x) \end{aligned}$$

où:

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{\langle x P_k(x), P_k(x) \rangle}{\langle P_k(x), P_k(x) \rangle} \text{ avec } k = 0, 1, \dots \\ B_k &= \frac{\langle P_k(x), P_k(x) \rangle}{\langle P_{k-1}(x), P_{k-1}(x) \rangle} \text{ avec } k = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Les abscisses (x_0, x_1, \dots, x_n) sont les zéros du polynômes orthogonal de degré $n + 1$ tel que défini au dessus (soit P_{n+1}).

$R(f)$ est un terme résiduel qui vaut:

$$R(f) = \frac{(b-a)^{2n+1} (n!)^4}{((2n)!)^3 (2n+1)} f^{(2n)}(\xi) \text{ avec } \xi \in [a, b]$$

Notons qu'une intégration à l'ordre n est exacte pour un polynôme de degré $2n - 1$.

A.2 Valeurs numériques

A.2.1 Utilisation de Gauss-Legendre dans l'espace XYZ

Les valeurs de poids et longueurs d'onde donnés ici sont différentes de celles figurant dans l'article de Wallis ([Wal75]), car celles-ci dépendent du domaine visible utilisé. Pour $\lambda_{inf} = 380nm$, $\lambda_{sup} = 700nm$ et des fonctions colorimétriques \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} échantillonnées tous les 5 nm, on obtient les valeurs figurant dans le tableau A.1.

A.2.2 Utilisation de Gauss-Legendre dans l'espace AC1C2

Pour la même raison que précédemment, le tableau A.2 contient des valeurs différentes que celles données par Meyer, dans son article [Mey88].

Notons de plus, que lorsque certains ordres d'intégration sont impossibles, pour les fonctions colorimétriques \bar{c}_1 et \bar{c}_2 . Cela correspond, mathématiquement, au fait de trouver des zéros pour le polynôme P_{n+1} en dehors de l'intervalle spécifié (le domaine du visible dans notre cas).

Ordre	X		Y		Z	
	longueur d'onde (nm)	poids	longueur d'onde (nm)	poids	longueur d'onde (nm)	poids
1	571.58	1.067	560.12	1.068	454.09	1.069
2	467.95	0.292	518.68	0.539	436.33	0.692
	610.63	0.775	602.28	0.529	486.69	0.377
3	440.87	0.168	485.88	0.163	425.38	0.364
	571.46	0.566	557.99	0.712	464.61	0.652
	637.58	0.333	630.81	0.193	523.15	0.052
4	432.76	0.125	459.95	0.044	416.25	0.164
	510.72	0.158	528.20	0.481	450.09	0.680
	595.00	0.641	589.20	0.481	492.53	0.220
	654.32	0.144	652.52	0.062	564.84	0.004
5	421.85	0.059	442.64	0.014	407.31	0.060
	460.68	0.127	504.17	0.225	438.30	0.529
	565.33	0.391	557.24	0.547	472.63	0.432
	618.00	0.441	612.41	0.259	518.86	0.047
	670.02	0.049	668.16	0.021	594.51	0.001
6	413.99	0.028	429.74	0.005	400.53	0.024
	448.45	0.135	481.19	0.083	430.16	0.359
	530.66	0.124	531.89	0.416	459.83	0.533
	586.43	0.489	580.82	0.427	496.20	0.144
	632.76	0.269	630.00	0.129	545.35	0.008
	679.33	0.022	678.74	0.008	609.28	0.000
7	406.28	0.011	418.67	0.002	395.78	0.012
	438.25	0.111	461.94	0.032	423.60	0.219
	477.91	0.068	511.24	0.233	449.35	0.518
	559.59	0.283	554.75	0.449	479.64	0.279
	604.53	0.440	599.79	0.285	518.71	0.039
	645.67	0.144	643.69	0.064	572.75	0.001
	686.09	0.011	685.62	0.004	619.59	0.000
8	399.75	0.005	409.10	0.001	392.49	0.007
	429.82	0.074	447.66	0.014	417.58	0.118
	460.51	0.096	492.15	0.105	440.52	0.439
	537.89	0.113	533.25	0.358	467.33	0.392
	580.57	0.377	574.26	0.381	499.48	0.102
	619.25	0.321	615.25	0.175	538.46	0.009
	656.32	0.075	654.57	0.032	590.80	0.000
	690.52	0.006	690.09	0.002	627.75	0.000

TAB. A.1 – Valeurs de poids et longueurs d'ondes pour Gauss-Legendre en XYZ

Ordre	A		C1		C2	
	longueur d'onde (nm)	poids	longueur d'onde (nm)	poids	longueur d'onde (nm)	poids
1	559.14	1.067			456.34	0.552
2	516.61	0.528	491.29	0.324	443.95	0.515
	600.91	0.538	630.69	-0.465	630.99	0.036
3	481.86	0.152			381.74	0.015
	556.22	0.717			447.28	0.506
	629.63	0.197			643.70	0.030
4	455.51	0.042	453.01	0.056		
	526.42	0.474	511.80	0.334		
	587.76	0.488	615.61	-0.465		
	651.64	0.063	667.50	-0.067		
5	438.88	0.015				
	501.77	0.215				
	555.64	0.552				
	611.22	0.263				
	667.50	0.022				
6	426.72	0.005	433.63	0.011	409.68	0.046
	478.02	0.078	473.74	0.106	442.30	0.348
	530.29	0.411	521.75	0.301	482.54	0.189
	579.49	0.432	606.82	-0.397	525.46	-0.071
	629.09	0.131	646.95	-0.150	626.67	0.036
	678.30	0.009	686.65	-0.011	675.64	0.004
7	416.37	0.002			402.43	0.018
	458.72	0.032			433.03	0.243
	509.45	0.225			465.51	0.285
	553.37	0.452			554.28	-0.049
	598.69	0.287			599.52	0.032
	642.98	0.064			641.22	0.021
	685.33	0.004			683.81	0.002
8	407.49	0.001	417.79	0.001	396.16	0.007
	444.82	0.015	450.22	0.032	424.09	0.128
	489.97	0.101	487.65	0.134	449.71	0.282
	531.91	0.356	527.71	0.264	477.60	0.137
	573.14	0.384	601.35	-0.334	541.68	-0.047
	614.40	0.176	635.63	-0.200	616.73	0.034
	654.04	0.032	668.70	-0.034	654.08	0.010
	689.91	0.002	695.06	-0.003	689.55	0.001

TAB. A.2 – Valeurs de poids et longueurs d'ondes pour Gauss-Legendre en AC1C2

Annexe B

Analyse en composantes principales: Méthode mathématique

Soit une famille de vecteurs libres (V_1, \dots, V_n) contenue dans un espace de dimension m . Alors, la méthode d'analyse en composantes principales nécessite de calculer tout d'abord la matrice de covariance de ces vecteurs, soit:

$$C = \begin{pmatrix} \langle V_1, V_1 \rangle & \cdots & \langle V_n, V_1 \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle V_1, V_n \rangle & \cdots & \langle V_n, V_n \rangle \end{pmatrix}$$

où le produit scalaire est défini classiquement par:

$$\langle V_i, V_j \rangle = \sum_{k=1}^{k=m} V_{i,k} V_{j,k}$$

Puis, il faut diagonaliser cette matrice. La possibilité nous en est assurée par le fait que C est symétrique.

Pour cela nous avons utilisé une méthode en deux étapes. La matrice est tout d'abord réduite en une forme tridiagonale, par la méthode de Householder. Ensuite, les vecteurs propres et valeurs propres sont obtenus via un algorithme de type QL avec décalage implicite.

On trouvera dans [PFTV88], pages 367 à 381, un codage informatique, en langage C, de ces méthodes.

On obtient ainsi une famille de vecteurs (E_1, \dots, E_n) orthonormés, dont les valeurs propres (vp_1, \dots, vp_n) toutes positives¹, sont classées par ordre décroissant.

1. Statistiquement, elles correspondent à des variances

La matrice de passage de (E_1, \dots, E_n) à (V_1, \dots, V_n) permet d'exprimer ces vecteurs dans la base d'origine, de dimension m .

La représentativité des p premiers vecteurs peut s'évaluer en calculant le rapport:

$$\frac{\sum_{k=1}^{k=p} vp_k}{\sum_{k=1}^{k=n} vp_k}$$

Si on projette orthogonalement les vecteurs (V_1, \dots, V_n) sur les p premiers vecteurs de la base (E_1, \dots, E_n) , alors la somme de toutes les approximations commises est minimisée au sens des moindres carrés. Formellement, soit V_{proj} le vecteur projeté correspondant à chaque V , celui-ci s'exprime ainsi:

$$V_{proj} = \sum_{k=1}^{k=p} \langle V, E_k \rangle E_k$$

L'erreur totale: $ErrTot = \sum_{l=1}^{l=n} \|V_l - V_{proj,l}\|_2$ est minimisée.

Bibliographie

- [Ada85] D.L. Mac Adam, *Color measurement: Theme and variation*, Springer Verlag, (Springer Series in Optical Sciences, Vol 27), 2nd Edition, 1985.
- [Bod88] H. W. Bodmann, *Luminance et luminosité*, LUX (1988), no. 148, 7–11.
- [Bor91] C. F. Borges, *Trichromatic approximation for computer graphics illumination model*, Computer Graphics **25** (1991), no. 4, 101–104.
- [Bor94] C.F. Borges, *Numerical determination of tristimulus values*, J. Opt. Soc. Am. **11** (1994), no. 12, 3152–3161.
- [Bra89] D.H. Brainard, *Calibration of computer controlled color monitor*, Color Research and Application **14** (1989), no. 1, 23–34.
- [Bur88] P.J. Burt, *Attention mechanism for vision in a dynamic world*, ICPR (1988), 977–987.
- [CM90] S. Comes and B. Macq, *Human visual quality criterion*, SPIE - Visual Communications and Image Processing '90 **1360** (1990), 2–13.
- [CMD76] C.S. Mc Camy, H. Marcus, and J.G. Davidson, *A color rendition chart*, Journal of Applied Photographics Engineering **2** (1976), no. 3, 95–99.
- [Col97] S. Collins, *Reconstructing the visual field of compound eye*, Rendering Techniques '97, Proceedings of the Eurographics Workshop, in St. Etienne, France, June 16-18, France (1997), 81–92.
- [Cow83] W.B. Cowan, *An inexpensive scheme for calibration of a colour monitor in terms of cie standard coordinate*, Computer Graphics **17** (1983), no. 3, 315–321.
- [DMCP94] P. Deville, S. Merzouk, D. Cazier, and J.C. Paul, *Spectral data modeling for a lighting application*, Eurographics 94 **13** (1994), no. 3, 97–106.
- [DT93] D. D'Amico and J. Taugourdeau, *Adaptation des images à la sensibilité de l'oeil*, Tech. report, IRISA Rennes, 1993.

-
- [DT96] E. Dinet and A. Treneau, *Spatio-color features for image quality assessment*, IS&T/OSA Annual conference on Optics & Imaging in the Information Age, Rochester (1996).
- [GH97] S. Gibson and R.J. Hubbard, *Perceptually-driven radiosity*, Computer graphics forum **16** (1997), no. 2, 129–141.
- [Gla95] A.S. Glassner, *Principles of digital image synthesis*, Morgan Kaufmann, 1995.
- [GM97] J. Geigel and F. K. Musgrave, *A model for simulating the photographic development process on digital images*, Proceedings of ACM SIGGRAPH '97 (1997).
- [GMY97] A. Gaddipatti, R. Machiraju, and R. Yagel, *Steering image generation with wavelet based perceptual metric*, Computer Graphics forum **16** (1997), no. 3, 241–251.
- [HSA91] P. Hanrahan, D. Salzman, and L. Aupperle, *A rapid hierarchical radiosity algorithm*, Computer Graphics **25** (1991), no. 4, 197–206.
- [Hun91] R. W. G. Hunt, *Measuring colour*, 2nd ed., Ellis Horwood, 1991.
- [Ieh97] J. C. Iehl, *Lancer de faisceaux et rendu spectral*, Tech. report, ENS Mines St. Etienne, 1997.
- [JFG96] P. Shirley J.A. Ferwada, S.N. Pattanaik and D.P. Greenberg, *A model of visual adaptation for realistic image synthesis*, Computer Graphics **30** (1996), no. 3, 249–258.
- [Lam85] K. M. Lam, *Metamerism and colour constancy*, Ph.D. thesis, University of Bradford, 1985.
- [Lev85] M. D. Levine, *Vision in man and machine*, McGraw-Hill Publishing Company, New-York, 1985.
- [Luo96] M. Ronnier Luo, *The llab model for colour appearance and colour difference evaluation*, SPIE **2658** (1996), 261–269.
- [Mai96] Jean-Luc Maillot, *Pseudo-réalisme et progressivité pour le tracé de rayons*, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France, September 1996.
- [MCP92] Jean-Luc Maillot, Laurent Carraro, and Bernard Péroche, *Progressive ray tracing*, Third Eurographics Workshop on Rendering, Bristol, England (1992), 9–19.
- [Mey88] G. Meyer, *Wavelength selection for synthetic image generation*, Computer Vision, Graphics and Image Processing (1988), no. 41, 57–79.

-
- [MKT⁺97] L. Markosian, M. A. Kowalski, S. J. Trychin, L. D. Bourdev, D. Goldstein, and J. F. Hughes, *Real-time nonphotorealistic rendering*, Proceedings of ACM SIGGRAPH '97 (1997).
- [MRC⁺86] G. W. Meyer, H. E. Rushmeier, M. F. Cohen, D. P. Greenberg, and K. E. Torrance, *An experimental evaluation of computer graphics imagery*, ACM Transactions on Graphics **5** (1986), no. 1, 30–50.
- [MS95] R. McDonald and K.J. Smith, *Cie94 - a new colour difference formula*, J. Soc. Dyers Col. **111** (1995), 376–379.
- [MSB88] W.B. Cowan M.C. Stone and J.C. Beatty, *Color gamut mapping and the printing of digital color images*, ACM Transactions on Graphics **7** (1988), no. 4, 249–292.
- [PC72] M. H. Pirenne and R. Crouzy, *L'oeil et la vision*, Gauthier-Villars Editeur, Paris, 1972.
- [PCV96] S. Pefferkorn, A. Chiron, and F. Viénot, *Développement d'une méthode de photométrie visuelle photopique*, Bulletin du BNM (1996), no. 106, 19–35.
- [Pee93] S. Peercy, *Linear color representation for full spectral rendering*, Computer Graphics **27** (1993), 191–198.
- [PFTV88] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical recipes in c - the art of scientific computing*, Cambridge University Press, 1988.
- [RF91] M. G. Raso and A. Fournier, *A piecewise polynomial approach to shading using spectral distribution*, Proceedings of Graphics Interface 91, Calgary, Canada (1991), 40–46.
- [Roe93] Marc Roelens, *Un environnement pour le tracé de rayons utilisant une modélisation par arbre de construction*, Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France, February 1993.
- [Rou94] G. Rougeron, *Rendu de couleurs à partir de données spectrales - rapport de recherche 94.7*, Tech. report, ENS Mines St. Etienne, 1994.
- [RP97a] G. Rougeron and B. Péroche, *An adaptive representation of spectral data for reflectance computations*, Rendering Techniques '97, Proceedings of the Eurographics Workshop, in St. Etienne, France, June 16-18, France (1997), 127–138.
- [RP97b] G. Rougeron and B. Péroche, *Une distance perceptuelle en synthèse d'images couleurs - rapport de recherche 97.7*, Tech. report, ENS Mines de St. Etienne, 1997.

-
- [RP98] G. Rougeron and B. Péroche, *Color fidelity in computer graphics: A survey*, Computer Graphics forum **17** (1998), no. 1, 1–13.
- [RWP⁺95] H. Rushmeier, G. Ward, C. Piatko, P. Sanders, and B. Rust, *Comparing real and synthetic images: Some ideas about metrics*, 6th Eurographics Workshop on Rendering, Dublin (1995), 213–222.
- [Sev96] R. Seve, *Physique de la couleur, de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Masson, Coll. Physique fondamentale et appliquée, 1996.
- [Smi93] M. Smith, *A new method of generating accurate color renderings of architectural spaces*, Journal of the Illuminant Engineering Society (1993), 26–32.
- [SS63] S.S. Stevens and J.C. Stevens, *Brightness function: Effect of adaptation*, J. Opt. Soc. Am **53** (1963), no. 3, 375–385.
- [SSS92] B. Smith, C. Spiekermann, and R. Sember, *Numerical methods for colorimetric calculations: A comparison of integration methods*, Color research and Application **17** (1992), no. 6, 384–393.
- [SSZG95] G. Spencer, P. Shirley, K. Zimmerman, and D. Greenberg, *Physically-based glare effects for computer generated images*, Proceedings ACM SIGGRAPH '95 (1995), 325–334.
- [SW97] D. A. Socolinsky and L. B. Wolff, *Accurate visualization of the cie color surface in 3-d space*, 8th AIC Color Congress, May 25-30, Kyoto, Japan (1997).
- [TDF96] A. Tremeau, E. Dinet, and E. Favier, *Measurement and display of color image differences based on visual attention*, Journal of Imaging Science and Technology, IS&T/SID **40** (1996), no. 6, 522–534.
- [TO97] T. Tanka and N. Ohnishi, *Painting-like image emphasis based on human vision systems*, EUROGRAPHICS '97 **16** (1997), no. 3, 253–260.
- [TPDL95] A. Tremeau, V. Pugnet, E. Dinet, and B. Laget, *A local color correlation measure for color image comparison*, Proceedings of the 3rd Color Image Conference, Scottsdale, IS&T/SID (1995), 119–122.
- [TR93] J. Tumblin and H. Rushmeier, *Tone reproduction for realistic computer generated images*, IEEE Computer Graphics & Applications **13** (1993), no. 6, 42–48.
- [Tre93] Alain Tremeau, *Contribution des modèles de la perception visuelle à l'analyse d'image couleur*, Ph.D. thesis, Université Jean Monnet de Saint Etienne, October 1993.
- [VB91] F. Viénot and H. Brettel, *Vers une colorimétrie physiologique*, L'Onde Electrique **71** (1991), no. 6, 7–12.

-
- [Wal75] R. Wallis, *Fast computation of tristimulus values by use of gaussian quadrature*, J. Opt. Soc. Am **65** (1975), no. 1, 91–94.
- [Wan87] B. Wandell, *The synthesis and analysis of color images*, IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence **PAMI-91** (1987), 2–13.
- [War94] G.J. Ward, *A contrast-based scalefactor for luminance display*, Graphics Gems IV (1994), 415–421.
- [WS82] G. Wysecki and W. Stiles, *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [ZCB97] E. Zeghers, S. Carré, and K. Bouatouch, *Error-bound wavelength selection for spectral rendering*, Tech. report, IRISA Rennes, 1997.
- [ZP98] J. Zaninetti and B. Péroche, *A vector model for global illumination in ray tracing*, Proceedings of WSCG'98 - Plzen (Czech Republic) - Volume III (1998), 448–455.

PROBLEMES LIES A LA COULEUR EN SYNTHESE D'IMAGES

Résumé:

La quête vers un photoréalisme accru en synthèse d'images est passée jusqu'ici par une amélioration de la simulation des phénomènes physiques. En revanche, la manipulation de l'information couleur est demeurée quelque peu délaissée. Le but de ce mémoire est de présenter un certain nombre de problèmes liés à la couleur en synthèse d'images, et d'y apporter autant que possible des solutions.

Nous analysons tout d'abord la mise en oeuvre informatique d'un logiciel de rendu prenant en compte l'aspect spectral de la lumière. La solution la plus simple étant très coûteuse, les approches algorithmiques plus efficaces connues à ce jour sont présentées, puis comparées. Nous proposons alors une méthode adaptative où les données spectrales sont approximées plus ou moins finement en fonction d'une estimation dynamique de l'erreur colorimétrique.

Nous présentons dans un deuxième temps le problème de la visualisation des données calculées par un logiciel de rendu spectral. Celle-ci doit se faire au sens d'une fidélité couleur auprès de deux observateurs humains (l'un virtuel plongé dans la scène, et l'autre présent devant l'outil de visualisation). Il est donc nécessaire de posséder un modèle de vision de la couleur inversible, ainsi qu'un modèle de moniteur couleur. Les solutions connues sont passées en revue. Et, quelques voix de recherches sont suggérées.

Nous abordons finalement le problème de l'évaluation d'une distance perceptuelle entre images en couleur. Après un rappel des méthodes existantes, nous proposons un algorithme spécifique à la synthèse d'images. Celui-ci s'appuie sur la notion de focus d'attention, et sur l'utilisation d'un espace couleur uniforme récemment défini.

Mots clés : Synthèse d'images, Radiométrie, Photométrie, Colorimétrie, Rendu spectral, Fidélité couleur, Comparaison d'images.

COLOR-RELATED PROBLEMS IN COMPUTER GRAPHICS

Abstract :

To achieve the goal of photorealism in computer graphics, most of the efforts until now led on the simulation of physical phenomena. Meanwhile, the manipulation of color information was neglected. The purpose of this thesis is to present a certain number of problems in relation with color in computer graphics, and to give as much as possible some solutions to these problems. We first analyse the implementation of a rendering software taking the spectral nature of light into account. As the simplest solution is very expensive, more efficient algorithms known today are reviewed and compared. We then propose an adaptive algorithm for which spectral data are more or less precisely represented according to a dynamic estimation of colorimetric error.

We then present the problem of visualizing the data computed by a spectral rendering software. For this, color fidelity must be assessed in accordance with two human observers (one of them supposed to be facing the scene, the other one being placed in front of the visualization device). Therefore, an invertible model of color vision and a model of color monitor are required. We survey known solutions. And we propose some future ways of research.

Finally, the definition of a perceptual distance between color images is discussed. After a short review of known solutions, we suggest an algorithm specific to the field of computer graphics, which is based on one hand on the notion of attention focus, and on the other hand, on the use of a recently defined uniform color space.

Keywords : Computer graphics, Radiometry, photometry, Colorimetry, Spectral rendering, Color fidelity, Image comparison.